

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа - Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки - 27.04.04 «Управление в технических системах»  
 Отделение школы (НОЦ) - Отделение автоматизации и робототехники

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Система динамического управления групповым позиционированием объектов “Кинетический дождь”</b>

УДК 681.51.033::004.925.84

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM81	Юдин Андрей Игоревич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ ИШИТР	Фадеев Александр Сергеевич	к.т.н.		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Кузьминская Елена Вячеславовна	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	к. э. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Горбенко Михаил Владимирович	к. т. н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Пушкарев Максим Иванович	к.т.н.		

Томск – 2020 г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (КОМПЕТЕНЦИИ ВЫПУСКНИКОВ)

по направлению 27.04.04 «Управление в технических системах»

Код результатов	Результаты обучения  Профессиональные и общепрофессиональные компетенции
P1	Применять глубокие естественнонаучные и математические знания для решения научных и инженерных задач в области анализа, синтеза, проектирования, производства и эксплуатации средств автоматизации и систем управления техническими объектами.
P2	Уметь обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации средств автоматизации и систем управления техническими объектами
P3	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа, связанные с разработкой технических систем управления с использованием аналитических методов и сложных моделей.
P4	Выполнять инновационные инженерные проекты по разработке программно-аппаратных средств автоматизированных систем различного назначения с использованием современных методов проектирования, систем автоматизированного проектирования, передового опыта разработки конкурентно способных изделий.
P5	Планировать и проводить теоретические и экспериментальные исследования в области проектирования аппаратных и программных средств автоматизированных систем с использованием новейших достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта. Критически оценивать полученные данные и делать выводы.
P6	Осуществлять авторское сопровождение процессов проектирования, внедрения и эксплуатации программно-аппаратных средств автоматизированных систем различного назначения.
P7	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной профессиональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий партнеров
P8	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, активно владеть иностранным языком, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности, в том числе на иностранном языке.
P9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена и руководителя группы, в том числе междисциплинарной и международной, при решении инновационных инженерных задач.
P10	Демонстрировать личную ответственность и ответственность за работу возглавляемого коллектива, приверженность и готовность следовать профессиональной этике и нормам ведения инновационной инженерной деятельности. Демонстрировать глубокие знания правовых, социальных, экологических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности.
P11	Демонстрировать способность к самостоятельному обучению, непрерывному самосовершенствованию в инженерной деятельности, способность к педагогической деятельности.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа - Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки - 27.04.04 «Управление в технических системах»  
 Отделение школы (НОЦ) - Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Пушкарев М.И.  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерская диссертация
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
8AM81	Юдину Андрею Игоревичу

Тема работы:

<b>Система динамического управления групповым позиционированием объектов “Кинетический дождь”</b>
Утверждена приказом директора (дата, номер)    № 62-52/с от 02.03.2020 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	10.06.2020
--	------------

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	Презентация существующей системы. Описания микроконтроллеров серии STM32. Характеристики двигателей 28BYJ-48 и Nema 17. Описание протокола передачи данных для RGB-светодиода WS2812b.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	1. Разработка концепции системы. 2. Проектирование основных узлов системы. 3. Разработка программного обеспечения устройств системы. 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 5. Социальная ответственность.
<b>Перечень графического материала</b>	Презентация
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский Владимир Юрьевич

Социальная ответственность	Горбенко Михаил Владимирович
Раздел на иностранном языке	Сидоренко Татьяна Валерьевна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Разработка концепции системы	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	24.02.2020
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ ИШИТР	Фадеев Александр Сергеевич	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM81	Юдин Андрей Игоревич		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа - Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки - 27.04.04 «Управление в технических системах»  
 Уровень образования - Магистратура  
 Отделение школы (НОЦ) - Отделение автоматизации и робототехники  
 Период выполнения - Весенний семестр 2019/2020 учебного года

Форма представления работы:

<b>Магистерская диссертация</b>
(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	10.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.04.2020	Раздел 1. Разработка концепции системы	30
20.04.2020	Раздел 2. Проектирование основных узлов системы	20
10.05.2020	Раздел 3. Разработка программного обеспечения устройств системы	20
20.05.2020	Раздел 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
20.05.2020	Раздел 5. Социальная ответственность	15

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ ИШИТР	Фадеев Александр Сергеевич	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Пушкарев Максим Иванович	к.т.н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА**  
**«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И**  
**РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8AM81	Юдину Андрею Игоревичу

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	27.04.04 "Управление в технических системах"

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Использовать действующие ценники и договорные цены на потребленные материальные и информационные ресурсы, а также указанную в МУ величину тарифа на эл. энергию
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	—
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Действующие ставки единого социального налога и НДС (см. МУ)

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Построение плана-графика выполнения ВКР, составление соответствующей сметы затрат, расчет величины НДС и цены результата ВКР
---	--

**Перечень графического материала:** (с точным указанием обязательных чертежей):

1. График проведения и бюджет НТИ
2. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	24.02.2020
--	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	К. Э. Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM81	Юдин Андрей Игоревич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА "СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ"

Студенту:

Группа	ФИО
8AM81	Юдину Андрею Игоревичу

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	27.04.04 "Управление в технических системах"

Тема ВКР:

Система динамического управления групповым позиционированием объектов "Кинетический дождь"	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Разрабатывается система управления групповым позиционированием объектов, формирующих инсталляции в двух-трехмерном пространстве. Система может использоваться в качестве инструмента привлечения клиентов в торговые центры, а также для визуального сопровождения различных представлений и шоу.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).</li> <li>– ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</li> <li>– СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Выявленные вредные факторы: – нарушение параметров микроклимата; – повышенный шум; – недостаточное освещение; – электромагнитные излучения. Анализ выявленных опасных факторов: – опасность поражения электрическим током.
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	При выполнении работы влияние на атмосферу и гидросферу не происходит. Осуществляется воздействие на литосферу при утилизации отходов электронной промышленности.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Выбор и описание возможных ЧС;

	типичная ЧС – Пожар на рабочем месте.
--	---------------------------------------

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	24.02.2020
--	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Горбенко Михаил Владимирович	к. т. н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM81	Юдин Андрей Игоревич		



## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 141 страницу, 43 рисунка, 30 таблиц, 30 формул, 44 источника, 5 приложений.

Ключевые слова: “Кинетический дождь”, система управления, позиционирование, инсталляция, шаговый двигатель, микроконтроллер.

Цель работы — разработка системы управления групповым позиционированием объектов, формирующих инсталляции в двух- трехмерном пространстве.

В процессе исследования производился подбор компонентов основных узлов системы, разработка алгоритмов, формирующих логику работы этих узлов и обеспечивающих взаимодействие между ними, и концепции работы системы в целом. Также было проведено моделирование процесса формирования инсталляции, в ходе которого была получена инсталляция визуально схожая с заданным уравнением движения.

Результатом исследований является макет системы, состоящий из сервера управления и одного исполнительного устройства. На базе макета была проведена апробация разработанного программного обеспечения, которое показало свою работоспособность.

В будущем необходимо провести проверки программного обеспечения на системе с большим количеством объектов, в состав которой входят устройства, собранные на базе разработанных печатных плат. По результатам проверок будут проведены необходимые корректировки.

## Обозначения и сокращения

В данной работе применены следующие сокращения с соответствующими расшифровками:

ADU — Данные фрейма;

CAN — Сеть контроллеров;

COM — Последовательный порт;

I2C — Межмикросхемное соединение;

PDU — Данные протокола;

RGB — Способ кодирования для цветовоспроизведения с помощью трех цветов: красного, зеленого, синего;

RS — Стандарт физического уровня для асинхронного интерфейса;

RTU — Удаленный терминал;

SPI — Последовательный периферийный интерфейс;

USB — Универсальная последовательная шина;

Wi-Fi — Технология беспроводной локальной сети с устройствами на основе стандартов IEEE 802.11;

КЕО — Коэффициент естественного освещения;

ПДК — Предельно допустимая концентрация;

ПК — Персональный компьютер;

ПЛИС — Программируемая интегральная логическая схема;

ПО — Программное обеспечение;

ПУЭ — Правила устройства электроустановок;

ШИМ — Широтно-импульсная модуляция;

ЭВМ — Электронно-вычислительная машина.

## Оглавление

Введение.....	15
1 Разработка концепции системы.....	17
1.1 Интерфейсы передачи данных между узлами системы.....	19
1.1.1 Обмен данными между исполнительными устройствами и сервером управления .....	19
1.1.2 Обмен данными между ПК и сервером управления .....	20
1.2 Структурная схема системы .....	20
1.3 Аналитическая модель движения “капель” .....	21
1.4 Вывод по главе 1 .....	33
2 Проектирование основных узлов системы.....	34
2.1 Исполнительное устройство .....	34
2.1.1 Двигатель для перемещения “капли” .....	34
2.1.1.1 Шаговый двигатель .....	36
2.1.1.2 Режимы работы шагового двигателя.....	40
2.1.1.3 Подключение шагового двигателя.....	41
2.1.2 Датчик конечного положения “капли” .....	43
2.1.2.1 Методика определения конечных положений.....	43
2.1.3 Сетевой адаптер .....	47
2.1.4 RGB-светодиод.....	48
2.1.5 Выбор микроконтроллера .....	49
2.1.6 Структурная схема макета исполнительного устройства.....	50
2.1.7 Разработка печатной платы исполнительного устройства.....	52
2.2 Сервер управления .....	54
2.3 Адаптер USB – RS-232 .....	54
2.4 Выбор микроконтроллера .....	55
2.5 Структурная схема макета сервера управления .....	56
2.6 Разработка печатной платы сервера управления.....	58
2.7 Вывод по главе 2 .....	59

3	Разработка программного обеспечения устройств системы .....	60
3.1	Описание логики работы исполнительного устройства .....	60
3.1.1	Управление двигателем.....	60
3.1.2	Протокол обмена данными между исполнительным устройством и сервером управления .....	62
3.2	Описание логики работы сервера управления.....	66
3.2.1	Передача и прием данных в режиме реального времени .....	66
3.2.2	Протокол обмена данными между сервером управления и генератором поверхности.....	68
3.3	Управление RGB-светодиодами.....	69
3.4	Встроенный загрузчик .....	71
3.5	Алгоритм самодиагностики .....	74
3.5.1	Диагностика исполнительного устройства .....	74
3.5.2	Диагностика сервера управления.....	75
3.6	Проверка полученных алгоритмов на макете системы.....	76
3.7	Вывод по главе 3 .....	77
4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	78
4.1	Организация и планирование работ .....	78
4.2	Продолжительность этапов работ .....	80
4.3	Расчет сметы затрат на выполнение проекта .....	82
4.3.1	Расчет затрат на материалы .....	83
4.3.2	Расчет заработной платы.....	84
4.3.3	Расчет затрат на социальный налог .....	85
4.3.4	Расчет затрат на электроэнергию .....	85
4.3.5	Расчет амортизационных расходов.....	86
4.3.6	Расчет прочих расходов .....	87
4.3.7	Расчет общей себестоимости разработки.....	88
4.3.8	Расчет прибыли .....	88
4.3.9	Расчет НДС .....	88

4.3.10 Цена разработки НИР .....	88
4.4 Оценка экономической эффективности проекта .....	89
5 Социальная ответственность .....	91
5.1 Аннотация .....	91
5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	92
5.2.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства .....	92
5.2.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя .....	94
5.3 Профессиональная социальная безопасность .....	96
5.3.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования .....	97
5.3.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследования .....	97
5.3.2.1 Микроклимат .....	97
5.3.2.2 Шум .....	98
5.3.2.3 Освещенность .....	99
5.3.2.4 Электромагнитные излучения .....	102
5.3.2.5 Электрический ток .....	103
5.4 Экологическая безопасность .....	105
5.4.1 Анализ влияния объекта на окружающую среду .....	105
5.4.2 Анализ “жизненного цикла” объекта исследования .....	105
5.4.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды от воздействий объекта исследования .....	106
5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	107
5.5.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследования .....	107
5.5.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при исследовании объекта .....	108

5.5.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС .....	109
Заключение .....	111
Список использованных источников .....	112
Приложение А (обязательное) Листинг скрипта, который демонстрирует работу системы с одним объектом.....	117
Приложение Б (обязательное) Листинг скрипта, который демонстрирует работу системы с множеством объектов .....	119
Приложение В (обязательное) Листинг скрипта, формирующего полный набор данных для системы.....	121
Приложение Г (обязательное) График реализации проекта.....	123
Приложение Д (обязательное) System concept development .....	124

## Введение

“Кинетический дождь” – движущаяся скульптура, расположенная в сингапурском аэропорту Чанги.

Система состоит из двух отдельных сегментов, установленных на расстоянии нескольких метров друг от друга и состоящих из заданного количества “капель дождя”. Двигатели с контроллерным управлением перемещают каждую “каплю” вверх и вниз, создавая сложные движущиеся формы [1].

В настоящее время данная система, помимо аэропорта в Сингапуре, в основном представляется только в виде образца новой технологии на всевозможных выставках и конференциях.

Целью данной работы является разработка системы управления групповым позиционированием объектов, формирующих инсталляции в двух- трехмерном пространстве, работающей на принципах, схожих с принципами “Кинетического дождя”.

Разрабатываемая система предназначена для популяризации технологий в массах людей через призму развлечений в различных местах массового скопления людей. Она может использоваться в качестве инструмента привлечения клиентов в торговые центры, а также для визуального сопровождения различных представлений и шоу.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

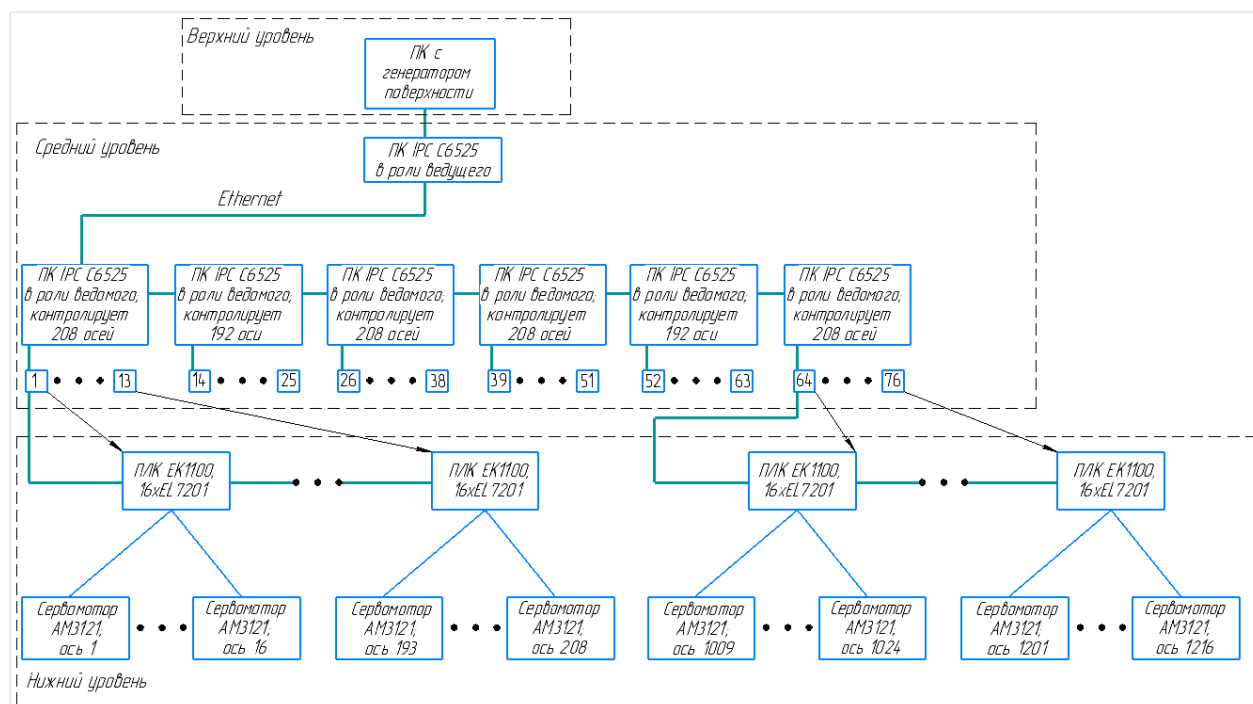
- сформировать основные требования и разработать концепцию системы;
- подобрать математический пакет для формирования необходимых данных об отображаемой форме;
- описать математическую модель движения “капель”;
- реализовать обмен информацией между математическим пакетом и сервером управления;
- подобрать интерфейс передачи данных для формирования локальной сети из сервера управления и исполнительных устройств;

- подобрать необходимые элементы и разработать структурные схемы исполнительного устройства и сервера управления;
- осуществить сборку макета системы и проверить логику её работы.



## 1 Разработка концепции системы

Данная система является системой точного позиционирования объектов посредством управления массивом двигателей с целью создания движущейся инсталляции. За основу при разработке системы была взята структурная схема существующей системы, представленная на рисунке 1.



ПЛК — промышленный логический контроллер

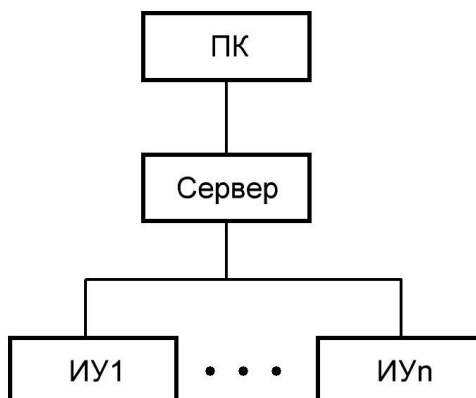
Рисунок 1 – Схема системы "Кинетический дождь"

Система состоит из трех уровней:

- верхний уровень, состоящий из ПК, на котором установлено специальное ПО для управления всей системой;
- средний уровень включает в себя промышленный ПК, в роли сервера управления, а также подчиненные промышленные ПК, которые управляют контроллерами двигателей;
- нижний уровень представляет собой сервомоторы с контроллерным управлением, которые непосредственно перемещают “капли дождя” [2].

На основе схемы, приведенной на рисунке 1, была разработана структурная схема системы управления групповым позиционированием объектов,

приведенная на рисунке 2. Основным критерием при разработке схемы было уменьшение количества используемой промежуточной аппаратуры.



ИУ — исполнительное устройство

Рисунок 2 – Структурная схема разрабатываемой системы управления

Система также состоит из трех уровней, как и существующая. Однако на среднем уровне находится только сервер управления, а на нижнем уровне каждое исполнительное устройство включает в себя контроллер управления и двигатель для перемещения объекта.

ПК передает серверу управления все необходимые данные для отображения инсталляции, затем сервер управления передает каждому исполнительному устройству всю необходимую для работы информацию.

К разрабатываемой системе были предъявлены следующие требования:

- проектная компоновка, то есть количество “капель дождя” должно быть изменяемым;
- формирование изменения 3D-поверхности со скоростью близкой к воспроизведению видеофайлов (от 10 до 25 кадров/с (10 - 25 Гц));
- изменение цвета “капли”, используя RGB-светодиод;
- обеспечение перемещения объекта со скоростью, не превышающей 2 м/с;
- простота монтажа и замены вышедшего из строя устройства;
- компактность компонентов системы;
- низкая стоимость системы.

## 1.1 Интерфейсы передачи данных между узлами системы

### 1.1.1 Обмен данными между исполнительными устройствами и сервером управления

Для передачи данных между исполнительными устройствами и сервером управления необходимо использовать интерфейс, который позволяет подключать большое количество устройств и поддерживает расширяемость сети. В таблице 1 рассматриваются возможные цифровые проводные интерфейсы передачи данных [3, 4, 5].

Беспроводные сети (например, Bluetooth, Wi-Fi и ZigBee) в данном случае не могут быть использованы, так как в местах большого скопления людей, например, в торговых центрах, наличие большого количества беспроводных устройств приведет к отказам системы ввиду низкой помехозащищенности по сравнению с проводной сетью [6].

Таблица 1 – Интерфейсы передачи данных

	Ethernet	RS-232	RS-422	RS-485	CAN	I2C	SPI
Дальность связи, м	1000	30	1200	1200	1000	10	3
Количество подключаемых узлов	1024	2	10	32	64	127	8
Максимальная скорость передачи данных	1 Гбит/с	460 Кбит/с	10 Мбит/с	10 Мбит/с	500 Кбит/с	3,1 Мбит/с	2,1 Мбит/с

В интерфейсе SPI выбор мастером подчиненного устройства осуществляется с помощью перевода сигнала на линии “chip-select” нужного подчиненного устройства в низкий уровень. Поэтому количество устройств, подключаемых к мастеру по интерфейсу SPI определяется наличием необходимого количества входов/выходов ведущего устройства для линии “chip-select” каждого устройства.

На основании данных представленных в таблице 1, было решено использовать в качестве интерфейса передачи данных интерфейс Ethernet. Основным критерием для выбора послужил факт, что данный интерфейс позволяет подключить к одной линии данных до 1024 устройств и при этом поддерживает расширяемость сети с использованием дополнительного оборудования, что позволит по необходимости увеличить количество “капель дождя” и обеспечит простоту монтажа готовой системы.

### **1.1.2 Обмен данными между ПК и сервером управления**

Для передачи данных от ПК к серверу было решено использовать проводное соединение, так же, как и для связи между исполнительным устройством и сервером.

На основании данных, представленных в таблице 1, в качестве интерфейса передачи было решено выбрать интерфейс RS-232. Данный интерфейс позволяет организовать соединение точка-точка и передавать данные со скоростью 460 Кбит/с. Также существуют адаптеры RS-232 — USB, которые позволяют увеличить скорость передачи данных до 1 Мбит/с, что позволяет уменьшить время передачи информации между устройствами.

## **1.2 Структурная схема системы**

С учетом выбранных выше интерфейсов передачи данных, была сформирована итоговая структурная схема системы, представленная на рисунке 3.

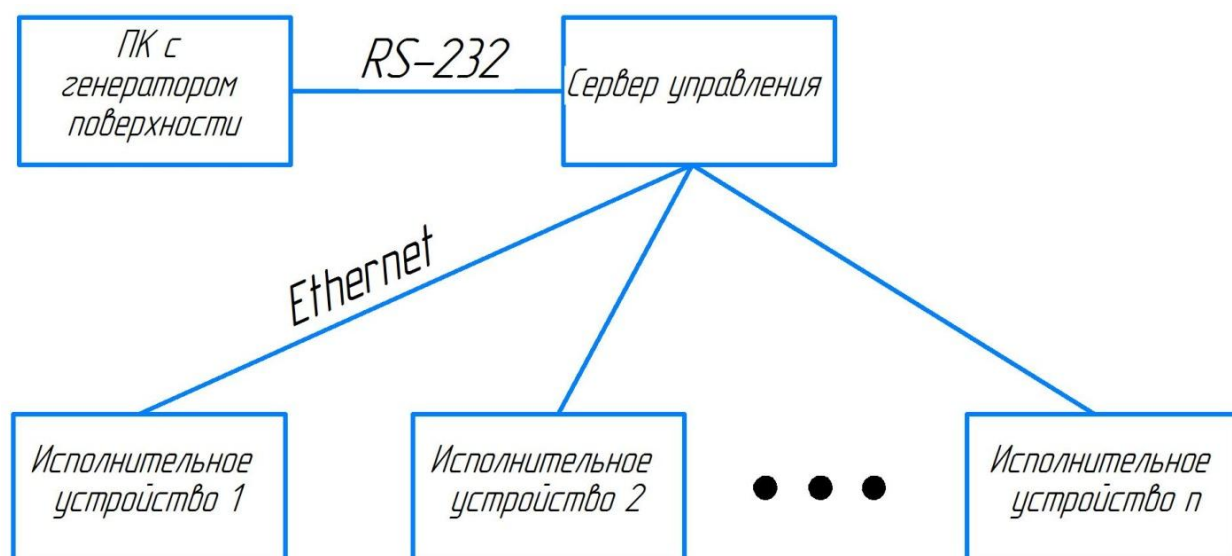


Рисунок 3 – Итоговая структурная схема системы

Сервер управления и исполнительные устройства объединены в соответствии с радиальной топологией. Каждое исполнительное устройство соединено с сервером собственной линией связи. Это позволяет системе осуществлять функционирование при выходе из строя нескольких исполнительных устройств. Нарушение функционирования всей системы возникает только при выходе из строя сервера управления и/или ПК с генератором поверхности. Топология сети, образованная ПК с генератором поверхности и сервером управления, представляет собой топологию точка-точка.

### 1.3 Аналитическая модель движения “капель”

Для реализации возможности проектирования программных компонентов системы было необходимо разработать аналитическую модель системы: описать процесс формирования инсталляции, посредством перемещения объектов в заданную координату с определенной скоростью.

Рассмотрим процесс формирования двухмерной инсталляции. Пусть имеется функция движения  $h(t)$  и количество объектов системы равно 5, расположенных в одном ряду (рисунок 4). Все объекты в момент времени  $t_0$  располагаются в нулевой позиции.

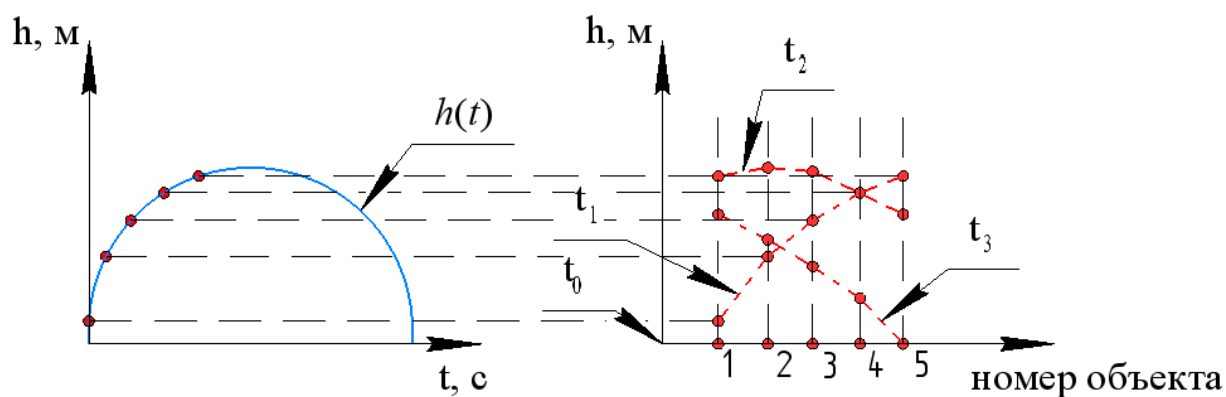


Рисунок 4 – Процесс образования двумерной инсталляции

Далее в моменты времени  $t_0 - t_3$  объекты системы выстраиваются определенным образом, изображая определенные участки заданной функции, как это показано для момента времени  $t_1$  (горизонтальные штриховые линии). При этом объекты системы перемещаются строго по вертикали. В данном двумерном пространстве объекты описываются номером позиции объекта в ряду и высотой положения объекта относительно начала координат.

Совместив фрагменты траектории, полученные в моменты времени  $t_0 - t_3$ , получим траекторию, представленную на рисунке 5.

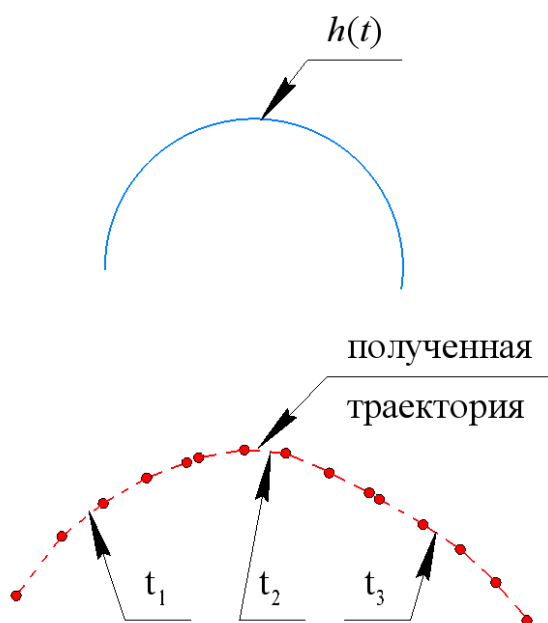


Рисунок 5 – Результат процесса образования двумерной инсталляции

На рисунке 5 полученная траектория повторяет фрагмент заданной траектории. Основное отличие заключается в ширине фрагментов, которое зависит от расстояния между объектами системы.

При формировании трехмерной инсталляции увеличивается количество рядов с объектами системы. При этом каждый ряд отображает свою часть заданной поверхности, переданной ему в виде двумерной траектории. Основным требованием при отображении двух- трехмерной инсталляции является синхронизация движения всех объектов системы, то есть время за которое каждый объект системы достигнет заданной координаты должно быть одинаковым для всех объектов. Таким образом для создания инсталляции в двух- трехмерном пространстве необходимо каждому объекту системы через определенные промежутки времени передавать координату и скорость перемещения

Получим аналитическое выражение для перемещения объекта системы по заданной траектории. Пусть имеется траектория движения объектов системы, представленная на рисунке 6, и необходимо переместить один объект системы из положения 1 в положение 2 за время  $\Delta t = t - t_0$ .

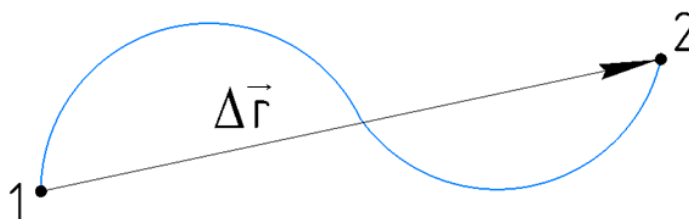


Рисунок 6 – Траектория движения объектов

Движение по такой траектории является неравномерным, так как на разных участках траектории скорость движения будет различной. Так как объект системы, представленный в виде “капли”, имеет только одну степень свободы и может перемещаться только по вертикали, то для плавного перемещения объекта по заданной траектории было принято решение разбить траекторию на малые промежутки и перемещать объект в их пределах с постоянной скоростью.

Разобьем траекторию движения на  $n$  не обязательно одинаковых линейных промежутков (рисунок 7).

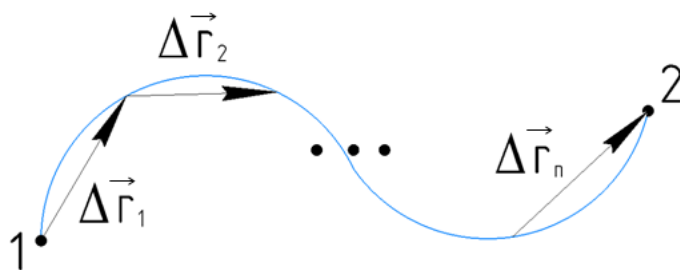


Рисунок 7 – Разбиение траектории на линейные промежутки

Скорость движения объекта на каждом участке определяется выражением:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}, \quad (1)$$

где  $\Delta \vec{r}$  – перемещение объекта, м;  
 $\Delta t$  – время перемещения объекта, с.

В пределах одного промежутка скорость движения объекта может изменяться, то есть объект может ускоряться или замедляться. Ускорение объекта определяется следующим выражением:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}, \quad (2)$$

где  $\Delta \vec{r}$  – перемещение объекта, м;  
 $\Delta \vec{v}$  – скорость перемещения объекта, м/с;  
 $\Delta t$  – время перемещения объекта, с.

Из выражения (2) следует, что скорость в любой момент времени определяется выражением:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}(t_0) + \int_{t_0}^t \vec{a}(t) dt. \quad (3)$$

С учетом формул (1), (2) и (3) перемещение объекта определяется формулой:

$$\vec{r}(t) = \vec{r}(t_0) + \int_{t_0}^t (\vec{v}(t_0) + \vec{a}(t)) dt. \quad (4)$$



Так как движение объекта на каждом участке происходит с постоянной скоростью, то движение каждого объекта можно описать следующим выражением:

$$h = h_0 + v \cdot t, \quad (5)$$

где  $h$  – заданное положение “капли”, м;

$h_0$  – исходное положение “капли”, м;

$v$  – скорость перемещения “капли”, м/с;

$t$  – время перемещения объекта в заданную точку, с.

Значение времени  $t_0$  на каждом интервале принимается равным 0. Время  $t$  для перемещения каждого объекта системы от координаты  $h_0$  до  $h$  является одинаковой величиной для всех объектов системы и не изменяется на каждом отрезке движения. Таким образом, обеспечивается синхронизация момента достижения объектами системы заданных координат. В качестве значения  $h_0$  в выражении (5) принимается значение координаты, которое было достигнуто к моменту окончания движения по предыдущему линейному отрезку.

Далее было смоделировано движение объектов системы в соответствии с уравнением (5). В качестве генератора поверхности был выбран математический пакет MATLAB. Одним из преимуществ MATLAB, в отличие от других похожих по функциональным возможностям математических пакетов (Octave, Maple), является возможность передавать данные через COM-порт [7, 8, 9]. Однако недостатком данного математического пакета, как и пакета Maple, в отличие от Octave, является то, что они имеют платную лицензию и требуют больших вычислительных мощностей ПК. Поэтому в дальнейшем будет необходимо разработать собственное Windows-приложение, которое позволило бы создавать необходимые инсталляции и управлять всей системой.

Для моделирования процесса формирования инсталляции была сформирована функция движения с помощью бесплатной платформы Desmos [10]. Выражение функции имеет следующий вид:

$$f(t) = 0,939 \cdot \frac{(\sin(0,43 \cdot t) + 1) \cdot (\sin(t) + 1)}{(1 + e^{-t+13,5}) \cdot (1 + e^{t-135})}. \quad (6)$$

Функция (6) была определена на отрезке времени от 0 до 100 секунд с шагом 0,01. Таким образом, были получены 10000 значений функции  $f(t)$  для каждого отсчета времени. График функции представлен на рисунке 8.

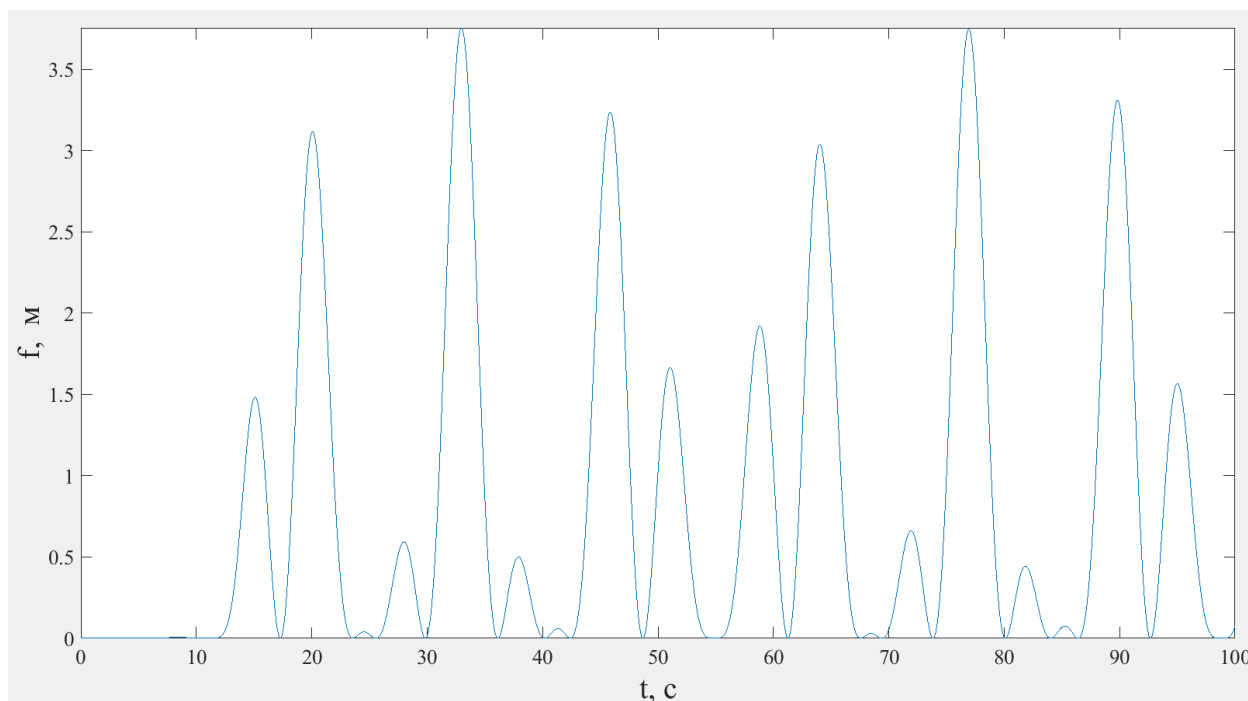


Рисунок 8 – График функции для формирования инсталляции в двумерном пространстве

Далее в математическом пакете Matlab был сформирован скрипт движения одного объекта, повторяющего траекторию, определенной сформированной выше функцией. Листинг скрипта представлен в приложении А.

В начальный момент времени объект системы находится в нулевой позиции, то есть  $h_0=0$ . Затем скрипт принимает в качестве заданной координаты  $h$  значение функции  $f(0)$ . Время перемещения, которое было принято равным 100 мс из соображений организации плавного движения (значение может быть изменено), определяет интервал времени, через которое объект системы достигнет заданной координаты. Разработанный скрипт на основании этих данных рассчитывает скорость движения объекта на линейном промежутке от своей

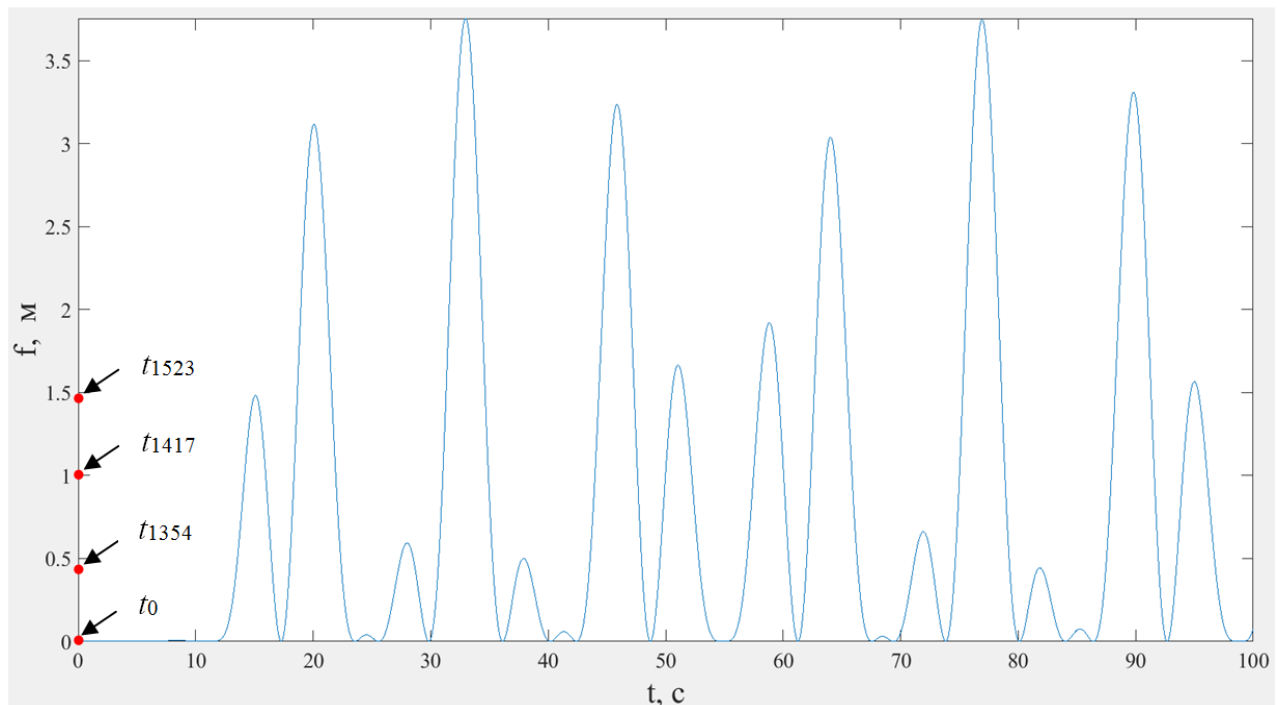
нулевой позиции до координаты начала функции движения, в соответствии с уравнением (5):

$$v(0) = \frac{h(0) - h_0(0)}{t} = \frac{f(0) - 0}{0,1} = \frac{0 - 0}{0,1} = 0 \text{ м/с.}$$

По достижении объектом системы заданной координаты ее значение принимается в качестве параметра  $h_0$ , то есть  $h_0 = f(0)$ , а в качестве параметра  $h$  скрипт принимает значение функции  $f(1)$ , то есть происходит сдвиг по значениям функции на единичный шаг. Затем скрипт снова рассчитывает скорость перемещения на заданном интервале:

$$v(1) = \frac{h(1) - h_0(1)}{t} = \frac{f(1) - f(0)}{0,1} = \frac{0 - 0}{0,1} = 0 \text{ м/с.}$$

Процедура расчета скоростей производится для всех значений функции  $f(t)$  (10000 значений) с единичным шагом. Рассчитанные таким образом скорости используются для визуализации перемещения объекта системы в заданную точку на каждом интервале. Результат работы скрипта представлены на рисунке 9.



$$t_0 = 0 \text{ с; } t_{1354} = 13,54 \text{ с; } t_{1417} = 14,17 \text{ с; } t_{1523} = 15,23 \text{ с}$$

Рисунок 9 – Движение одного объекта

На рисунке 9 обозначены позиции объекта системы, представленные в виде красных точек, в различные моменты времени. Объект системы принимает в качестве параметра  $h$  значения заданной функции, имея при этом только одну степень свободы. Затем в скрипт был добавлен цикл обработки движения всех объектов системы, как это приведено в приложении Б.

Количество объектов в системе было прямо равным 20. Основное отличие разработанного скрипта от описывающего движение одного объекта системы заключается в том, что движение каждого объекта описывается по формуле:

$$h_i(t + i) = h_0(t)_i + v_i(t) \cdot t, \quad (7)$$

где  $h_i$  – заданное положение “капли”, м;

$h_0$  – исходное положение “капли”, м;

$v_i$  – скорость перемещения “капли”, м/с;

$t$  – время перемещения объекта в заданную точку, с;

$i$  – номер “капли”.

В начальный момент времени каждая точка имеет свою заданную координату:  $h_1(t_0)=f(t_0+1)$ ,  $h_2(t_0)=f(t_0+2)$ , ...,  $h_{20}(t_0)=f(t_0+20)$ . Тогда в момент времени  $t_1$  имеем следующие заданные координаты объектов:  $h_1(t_1)=h_2(t_0)$ ,  $h_2(t_1)=h_3(t_0)$ , ...,  $h_{19}(t_1)=h_{20}(t_0)$ . Для 20-го объекта системы заданная координата  $h_{20}(t_1)$  равна значению функции  $f(t_1+20)$ . Таким образом, в модельном сигнале траектории движения, в каждый момент времени предыдущей объект системы повторяют траекторию движения последующего. При этом скорость объекта на каждом участке рассчитывается по формуле (7). Результат работы модернизированного скрипта представлен на рисунке 10.

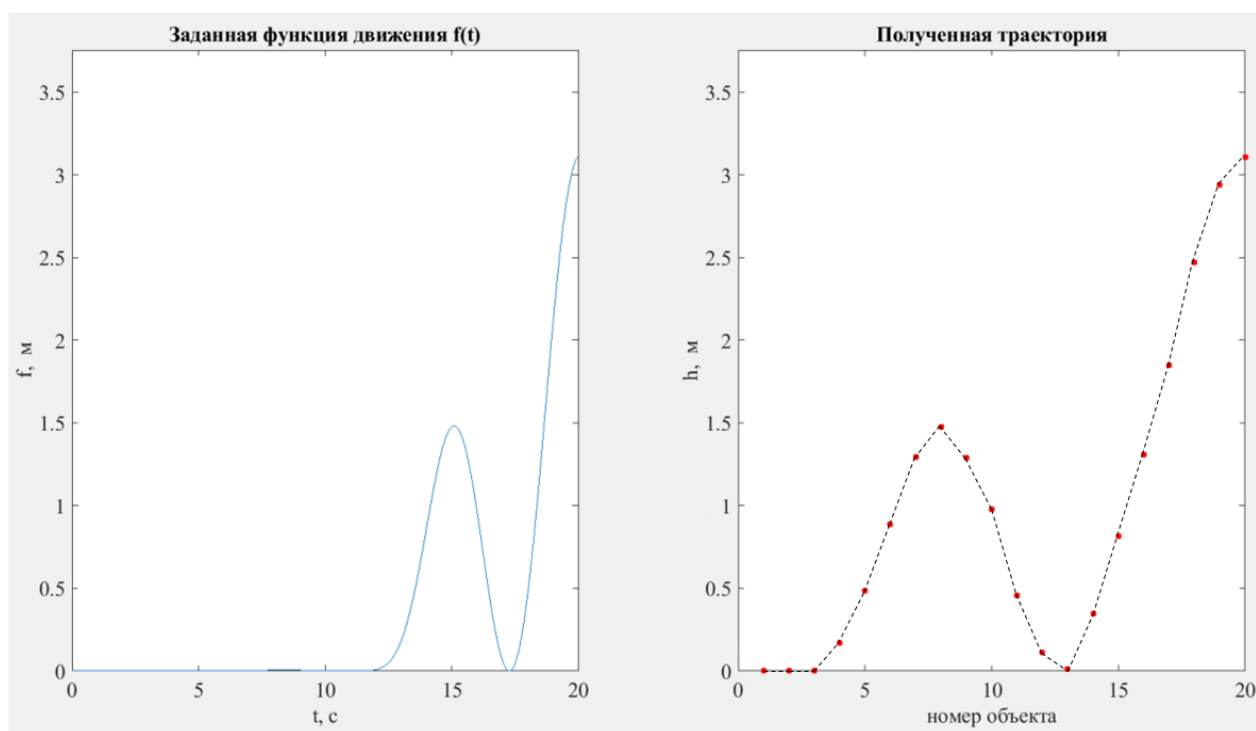


Рисунок 10 – Движение нескольких объектов

На рисунке 10 объекты системы, представленные в виде красных точек, образуют фрагмент траектории. Все объекты системы перемещаются по линейным промежуткам. Плавность движения объектов достигается благодаря формированию области определения заданной функции движения с шагом 0,01.

Для определения точности формирования заданного фрагмента траектории с помощью объектов системы, была сформирована таблица 2, содержащая данные координаты каждого объекта и теоретические координаты для объекта из заданной функции движения.

Таблица 2 – Теоретические и смоделированные координаты объектов

Номер объекта	Значение функции $f(t)$ , м	Координата $h$ объекта, м	Относительная погрешность, %
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0,1485	0,1492	0,47
5	0,4602	0,4679	1,67
6	0,8648	0,8738	1,04
7	1,2505	1,25	0,04

Продолжение таблицы 2 – Теоретические и смоделированные координаты объектов

Номер объекта	Значение функции $f(t)$ , м	Координата $h$ объекта, м	Относительная погрешность, %
8	1,4497	1,468	1,26
9	1,3455	1,336	0,71
10	0,9798	0,9813	0,15
11	0,5168	0,5108	1,16
12	0,1514	0,1517	0,2
13	0	0	0
14	0,2165	0,2157	0,37
15	0,6488	0,6462	0,40
16	1,265	1,276	0,87
17	1,7078	1,708	0,012
18	2,2124	2,212	0,02
19	2,8487	2,858	0,33
20	3,1092	3,109	0,006

В таблице 2, максимальная относительная погрешность при моделировании фрагмента траектории равна 1,67 %, следовательно, смоделированный фрагмент точно повторяет заданную функцию движения, что говорит о правильности математического описания движения объектов системы.

Для формирования инсталляции из объектов системы необходимо передавать серверу управления полный набор информации, представленный в виде заданных координат и скоростей, для всех объектов. Так как центр координат системы находится под потолком помещения, где она смонтирована, то для расчета заданных координат было решено из высоты помещения вычитать значения функции движения, для чего в скрипт была добавлена переменная, содержащая значение высоты помещения.

С целью формирования данных для всех объектов был разработан скрипт, который использует заранее определенные данные о высоте конструкции над уровнем пола, количестве объектов системы и времени перемещения. Листинг скрипта представлен в приложении В. Скрипт формирует на выходе два двумерных массива с заданными координатами и скоростями на каждом

шаге для 10 объектов системы как это представлено в таблицах 3 и 4, соответственно.

Таблица 3 – Фрагмент массива заданных координат на каждом шаге

Номер объекта	Время, с					
	0,01		1,75	1,76	1,77	100
1	0	...	0	0	0	0
2	0		0	0	0	0
3	0		0	0	0	0
4	0		0.0027	0.0028	0.0029	0
5	0		0.0053	0.0052	0.0051	0
6	0		0	0	0	0
7	0		0.0268	0.034	0.0427	0
8	0		0.9214	0.9902	1.0577	0
9	0		1.1274	1.0438	0.9551	0
10	0		0.0868	0.1518	0.2344	0

Таблица 4 – Фрагмент массива скоростей на каждом шаге

Номер объекта	Время, с					
	0,01		1,75	1,76	1,77	100
1	0	...	0	0	0	0
2	0		0	0	0	0
3	0		0	0	0	0
4	0		0.0011	0.0012	0.0012	0
5	0		0	-0.001	-0.0012	0
6	0		0	0	0	0
7	0		0.05969	0.07233	0.0867	0
8	0		0.6934	0.6881	0.6746	0
9	0		-0.7703	-0.8353	-0.8874	0
10	0		0.4703	0.6501	0.8252	0

На основании данных, представленных в таблицах 3 и 4, были построены графики данных (заданных координат и скоростей), передаваемых каждому объекту системы, представленные на рисунках 11 и 12.

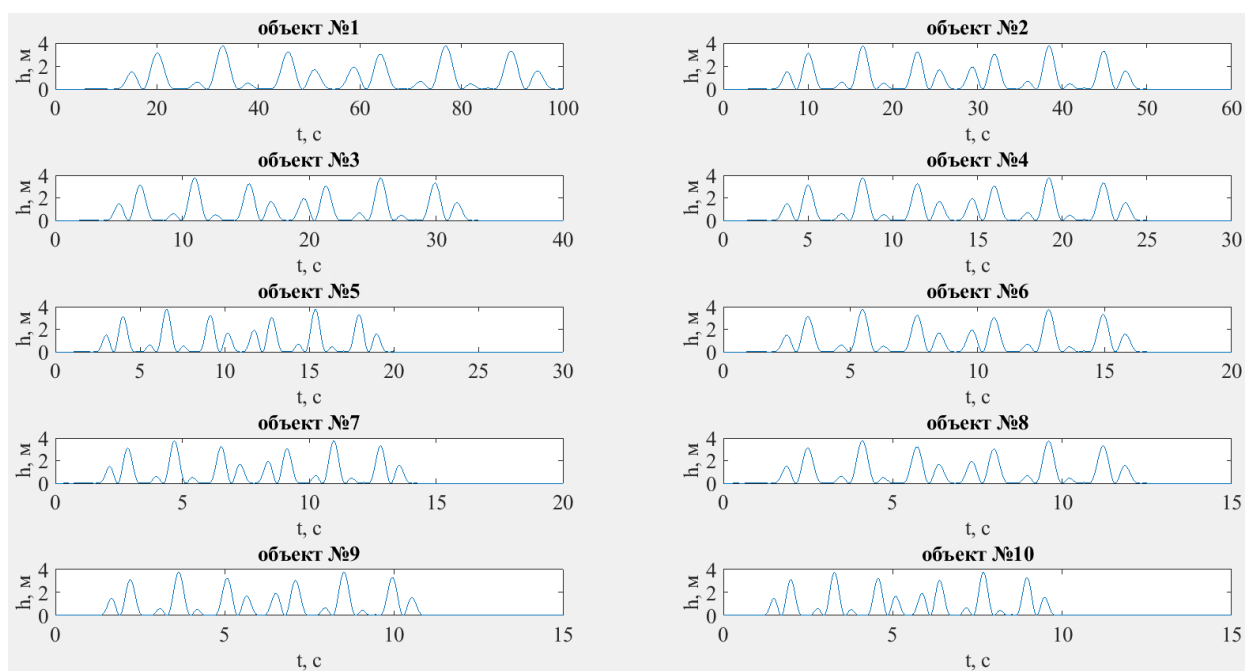


Рисунок 11 – Графики заданных координат для каждого объекта системы

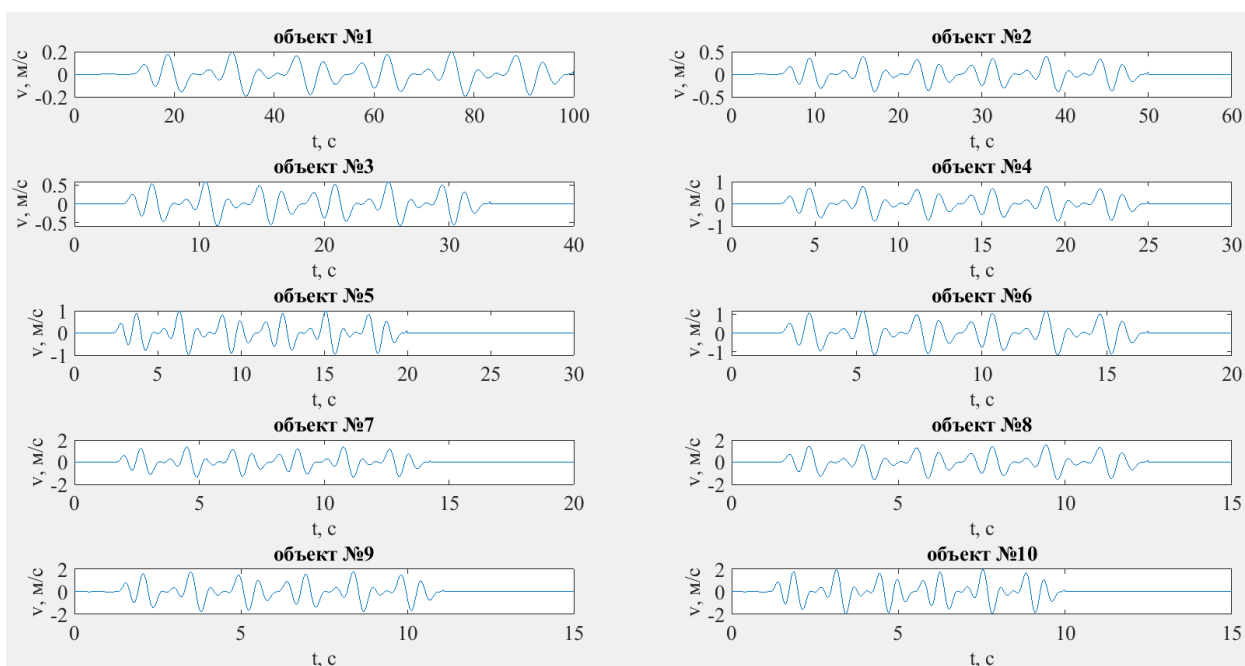


Рисунок 12 – Графики скоростей для каждого объекта системы

Ввиду того, что область определения функции движения ограничена и некоторые объекты системы достигнут ее раньше других, то в этом случае для них прекращается процесс расчета координат и скоростей, как это представлено на рисунках 11 и 12.

Кроме того, скрипт, представленный в приложении В, сравнивает рассчитанную на каждом шаге скорость с максимальной (2 м/с). При ее превыше-



нии программа выдает ошибку и предлагает установить другое время перемещения (за которое все объекты системы достигнут своих заданных положения), на основе которого необходимо пересчитать скорости движения для всех объектов системы (рисунок 13).

```
>> DataScript  
Установите параметр RefreshTime >= 51
```

Рисунок 13 – Ошибка при превышении максимальной скорости

В случае успешного выполнения скрипта, без ошибок, полученные данные отправляются каждому исполнительному устройству, через сервер управления через интервал времени, указанный в скрипте [11].

#### **1.4 Вывод по главе 1**

В настоящей главе были проработана концепция системы, определены ее основные узлы, подобраны интерфейсы связи между узлами и сформирована структурная схема системы.

Также была построена аналитическая модель движения “капель дождя” и смоделировано их движение с помощью пакета Matlab. Полученное математическое описание движения объектов системы позволяет располагать объекты системы в правильном порядке, при этом визуально точно повторяя заданную функцию движения. Большая неразрывность линии при формировании траектории в реальной системе может быть достигнута за счет увеличения количества объектов (“капель дождя”) и уменьшения расстояния между ними.

Кроме того, был разработан скрипт для формирования полного набора данных для работы системы. Полученные с помощью данного скрипта данные передаются каждому исполнительному устройству через определенный интервал времени.

## **2 Проектирование основных узлов системы**

Основными узлами системы являются исполнительные устройства и сервер управления. В данной главе были осуществлен подбор компонентов этих устройств и их разработаны принципиальные схемы.

### **2.1 Исполнительное устройство**

Исполнительное устройство предназначено для перемещения “капли” с определенной скоростью, а также обеспечения отображения необходимого цвета “капли дождя”.

На основе вышесказанного, а также требований к системе, представленных в главе 1, устройство управления должно включать в себя:

- двигатель для перемещения “капли”;
- встроенный загрузчик (“бутлоадер”);
- RGB-светодиод для отображения цвета капли;
- Ethernet – адаптер.

Далее был осуществлен подбор необходимых технических средств исполнительного устройства.

#### **2.1.1 Двигатель для перемещения “капли”**

Так как одной из задач исполнительного устройства является перемещение “капли дождя”, то для решения этой задачи необходимо использовать двигатель, который может вращаться как в одном, так и в обратном направлении, обеспечивая при этом небольшую погрешность при перемещении. Существуют следующие типы двигателей:

- асинхронный двигатель с редуктором;
- коллекторный двигатель;
- бесколлекторный двигатель;
- шаговый двигатель;
- серводвигатели и сервоприводы.

Асинхронные двигатели с редуктором используются в устройствах, когда не требуется высокая точность позиционирования. Такие двигатели часто применяют в ситуациях, когда необходимо обеспечить перемещение с постоянной скоростью. Достоинствами двигателя являются высокая надежность и простота эксплуатации. Среди недостатков следует отметить высокую стоимость частотных преобразователей, которые необходимы для регулирования скорости.

Коллекторные двигатели так же, как и асинхронные не обеспечивают высокой точности позиционирования. Достоинствами таких двигателей заключается в напряжении питания 12 или 24 В и отсутствие необходимости в специальных устройствах управления, а также низкая стоимость. К недостаткам можно отнести низкий срок службы, ввиду наличия трущихся и контактирующих частей.

Бесколлекторный двигатель несколько похож на коллекторный, однако в нем отсутствуют контактируемые части, что повышает срок службы двигателя. Для управления двигателем необходимо использовать специальный блок управления. К достоинствам таких двигателей можно отнести обеспечение возможности вращения с большой скоростью и бесшумность работы. Среди недостатков следует отметить высокая стоимость и необходимость специального блока управления.

Шаговый двигатель применяется в системах точного позиционирования, а также когда необходимо реализовать сложный алгоритм перемещения. Преимущество таких двигателей заключается в возможности задания угла и скорости перемещения, а также большой срок службы. К недостаткам следует отнести необходимость драйвера управления, высокую температуру поверхности во время работы, а также потерю крутящего момента на больших скоростях.

Сервопривод представляет собой сервомотор и блок управления. Точность позиционирования сервопривода определяется датчиком обратной связи. Достоинствами таких двигателей являются плавность и точность перемещений, безотказность работы, возможность работы на низких скоростях. Однако такие

двигатели имеют высокую стоимость, а также их настройка сложна, что делает применение сервоприводов не всегда обоснованным [12].

Исходя из требований к двигателю, было решено использовать шаговый двигатель, который часто используется в робототехнике, принтерах, манипуляторах, различных станках и прочих электронных приборах. Большим преимуществом шаговых двигателей является обеспечение точного углового позиционирования ротора. Также в шаговых двигателях имеется возможность быстрого старта, остановки и реверса.

#### 2.1.1.1 Шаговый двигатель

Шаговый двигатель — это бесколлекторный двигатель, ротор которого вращается не плавно, а шагами (дискретно). Полный оборот ротора состоит из нескольких шагов. Меняя форму сигнала, количество импульсов, их длительность и фазовый сдвиг, можно задавать скорость вращения, направление вращения и количество оборотов ротора двигателя. Устройство шагового двигателя представлено на рисунке 14.

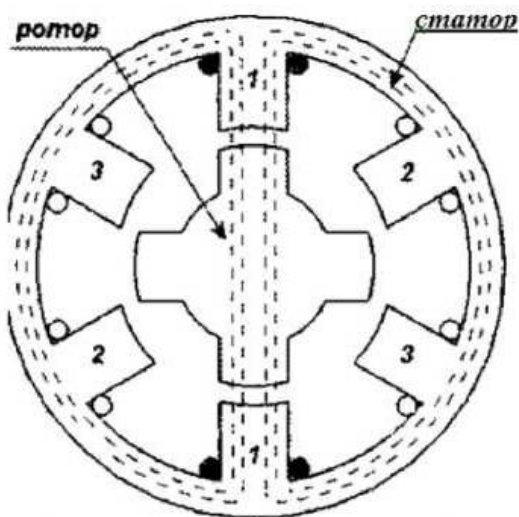


Рисунок 14 – Шаговый двигатель

Основные виды шаговых двигателей:

- с постоянными магнитами (ротор из магнитотвердого материала). На роторе установлен один, или несколько, постоянных магнитов;

- реактивный (ротор из магнитомягкого материала). Еще такие двигатели называют двигателями с переменным магнитным сопротивлением. Ротор не имеет постоянных магнитов, он выполнен из магнитомягкого материала в виде многоконечной звезды. Количество полных шагов в одном обороте таких двигателей, зависит от количества зубцов на звезде ротора, и количества электромагнитов на статоре;

- гибридный (совмещает технологии двух предыдущих двигателей). Ротор выполнен из магнитотвердого материала (как у двигателя с постоянными магнитами), но имеет форму многоконечной звезды (как у реактивного двигателя). Количество полных шагов в одном обороте таких двигателей, зависит от количества постоянных магнитов на звезде ротора, и количества электромагнитов на статоре.

Шаговый двигатель обеспечивает вращения ротора на заданный угол в зависимости от управляющего сигнала. Благодаря этому можно контролировать положение узлов механизмов и выходить в заданную позицию. Работа двигателя осуществляется следующим образом – в центральном вале имеется ряд магнитов и несколько катушек. При подаче питания создается магнитное поле, которое воздействует на магниты и заставляет вал вращаться. Такие параметры как угол поворота (шаги), направление движения задаются в программе для микроконтроллера [13].

Среди шаговых двигателей для микроконтроллеров выделяют следующие: 28BYJ-48 и двигатели серии Nema, среди которых наиболее популярен двигатель Nema 17, ввиду оптимальной стоимости из соотношения размеров и доступности. Внешний вид данных двигателей представлен на рисунках 15 и 16, соответственно.

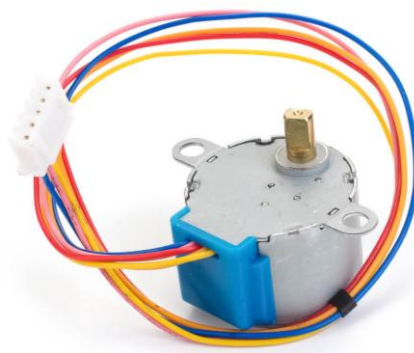


Рисунок 15 – Внешний вид шагового двигателя 2BYJ-48



Рисунок 16 – Внешний вид шагового двигателя Nema 17

Их сравнительные характеристики представлены в таблице 5 [13].

Таблица 5 – Характеристики шаговых двигателей

	Nema 17	28BYJ-48
Тип питания двигателя	Биполярный	Униполярный
Угловой шаг, °	1,8	5,625
Крутящий момент, г/см	5500	450
Максимальная частота вращения, об/мин	480	25
Стоимость двигателя, руб.	780	180

Далее для определения необходимого двигателя был рассчитан минимальный необходимый радиус катушки, обеспечивающей скорость движения “капли” 2 м/с при максимальной возможной скорости двигателя. Расчет производился по следующей формуле:

$$R = \frac{v}{\omega}, \quad (8)$$

где  $v$  – линейная скорость движения “капли”, м/с;

$\omega$  – угловая скорость вращения катушки, рад/с.

Угловая скорость вращения двигателя была найдена из формулы:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot \vartheta}{60}, \quad (9)$$

где  $\vartheta$  – максимальная частота вращения двигателя, об/мин.

С учетом (9) формула (8) примет вид:

$$R = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot \vartheta}, \quad (10)$$

Затем из формулы (10) были получены значения минимально необходимых радиусов катушек для каждого двигателя:

$$\text{Nema 17} - R = \frac{2 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 480} = 0,0398 \text{ м} \approx 4 \text{ см};$$

$$28\text{BYJ-48} - R = \frac{2 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 25} = 0,764 \text{ м} \approx 76 \text{ см}.$$

Из приведенных выше расчетов следует, что для обеспечения максимальной скорости движения “капли” согласно предъявленным требованиям для двигателя 28BYJ-48 необходима катушка диаметром 152 см, а для двигателя Nema 17 – 8 см. Исходя из данных, представленных в таблице 5 и полученных по формуле (10) расчетов, было принято решение использовать шаговый двигатель 28BYJ-48, ввиду его невысокой стоимости, для реализации макета и отработки технологии. Однако в конечной системе будет использоваться двигатель Nema 17, так как он обладает лучшими характеристиками, а также при его использовании необходима катушка диаметром 8 см для обеспечения максимальной скорости передвижения “капли”, что является существенным параметром при разработке корпуса устройства. Отрицательным моментом при использовании катушки с таким диаметром является необходимость работы двигателя на максимальной скорости вращения, что может привести к скоротечному износу двигателя, поэтому было принято решение обеспечивать возможность перемещения “капли” с максимально возможной скоростью при скорости вращения равной 50% от максимального значения. Вследствие этого необходимы диаметр катушки возрастает до 16 см, что является вполне допустимым значением.

### 2.1.1.2 Режимы работы шагового двигателя

Для работы шагового двигателя (вне зависимости от его вида) можно выбрать один из трех режимов работы:

- полношаговый режим - ротор поворачивается на 1 шаг за 1 такт (рисунок 17);
- полушаговый режим - ротор поворачивается на 1/2 шага за 1 такт (рисунок 18);
- микрошаговый режим - ротор поворачивается на 1/4, 1/8 и т.д. шагов за 1 такт (рисунок 19).

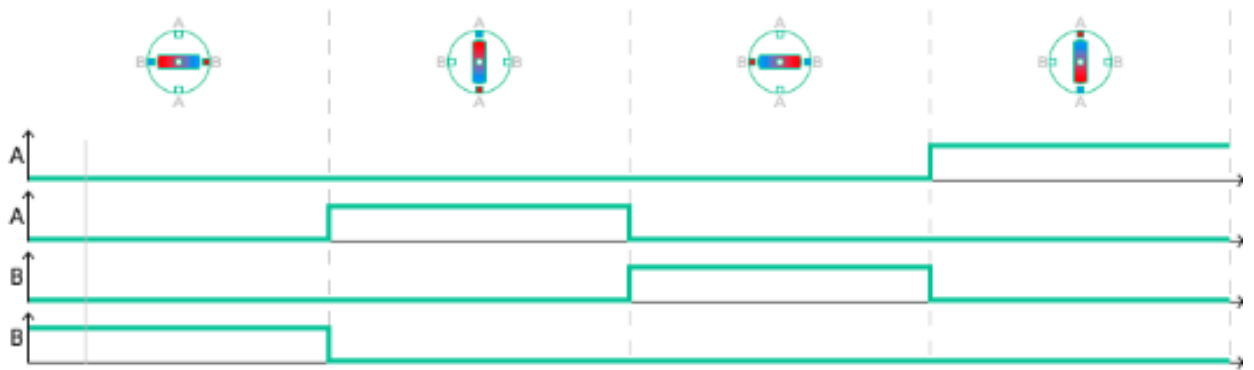


Рисунок 17 – Полношаговый режим

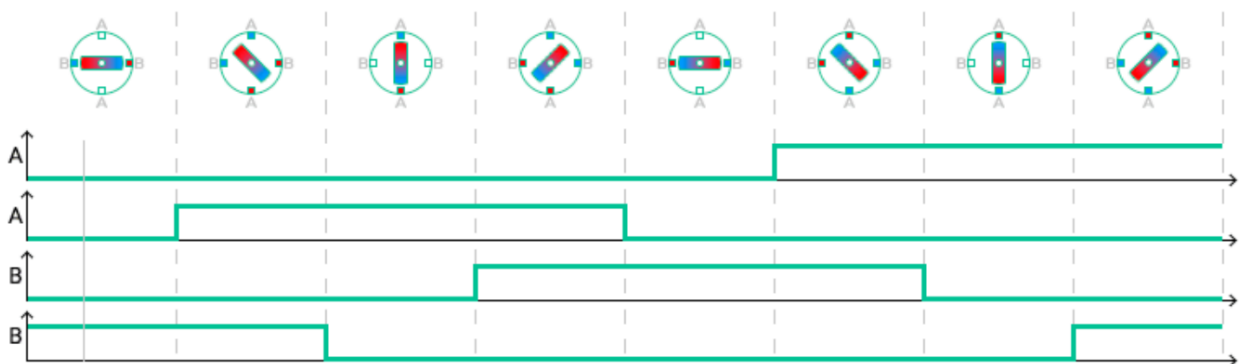


Рисунок 18 – Полушаговый режим



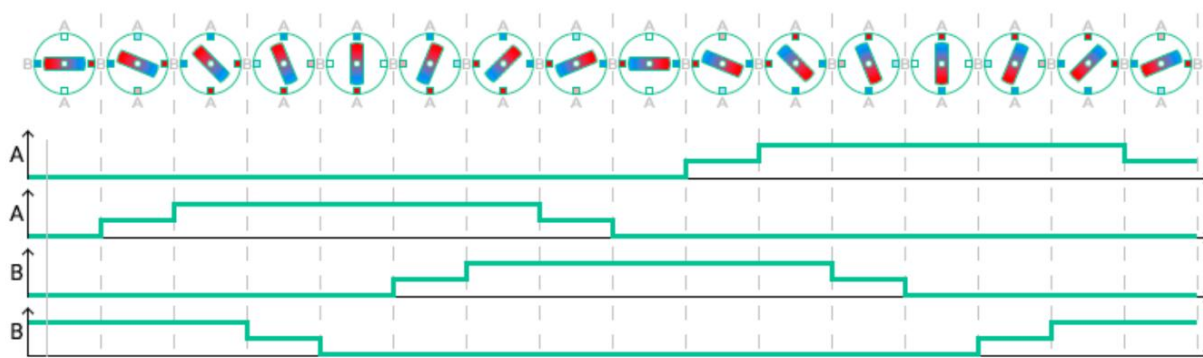


Рисунок 19 – Микрошаговый режим

Использование режимов работы с дробным делением шагов, позволяет снизить вибрации двигателя при работе, нагрев, а также позволяет увеличить точность позиционирования и плавность перемещения “капли”.

В данной работе было решено использовать микрошаговый режим работы с делением  $1/4$ , так как этот режим можно использовать как для двигателя 28BYJ-48, так и для Nema 17, что позволяет использовать одно программное обеспечение для микроконтроллера независимо от типа двигателя [14].

### 2.1.1.3 Подключение шагового двигателя

Особенностью использования шаговых двигателей является то, что нельзя их подключать к выводам микроконтроллера напрямую, так как они потребляют значительные токи, поэтому их подключают через драйверы.

К популярным драйверам для микроконтроллеров относятся: ULN2003, L298N, A4988 и DRV8825. Их сравнительные характеристики представлены в таблице 6 [15].

Таблица 6 – Сравнительные характеристики драйверов шаговых двигателей

Наименование	ULN2003	L298N	A4988	DRV8825
Режимы микрошагов	1, $1/2$ , $1/4$ , и $1/8$	1, $1/2$ , $1/4$ и $1/8$	1, $1/2$ , $1/4$ , $1/8$ и $1/16$	1, $1/2$ , $1/4$ , $1/8$ , $1/16$ и $1/32$
Количество подключаемых двигателей	1	2	1	1

Продолжение таблицы 6 – Сравнительные характеристики драйверов шаговых двигателей

Наименование	ULN2003	L298N	A4988	DRV8825
Максимальный ток, А	0.5	2	2	2.5
Напряжение питания, В	5 – 12	5 – 35	8 – 35	8 – 45
Стоимость, руб.	50	250	290	390

Исходя из данных, представленных в таблице 6, было принято решение использовать драйвер ULN2003, внешний вид которого представлен на рисунке 20, при создании макета, ввиду его небольшой себестоимости и маломощности двигателя 28BYJ-48.



Рисунок 20 – Внешний вид драйвера ULN2003

Также было принято решение использовать драйвер A4988, внешний вид которого представлен на рисунке 21, в конечном устройстве, совместно с двигателем Nema 17, так как этот драйвер имеет невысокую себестоимость по сравнению с DRV8825, а также обеспечивает более точное позиционирование по сравнению с L298N.

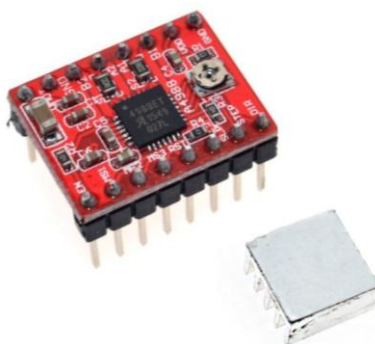


Рисунок 21 – Внешний вид драйвера A4988

### **2.1.2 Датчик конечного положения “капли”**

При перемещении капли необходимо фиксировать максимальные и минимальные конечные положения “капли” для предотвращения механических повреждений устройства, а также его неверной работы. В качестве датчика конечного положения было решено использовать датчик Холла.

Данный датчик был выбран из тех соображений, что точность его показаний, в отличие от лазерных датчиков, щелевых датчиков и ультразвуковых датчиков, которые являются часто используемыми элементами в качестве датчиков конечного положения, незначительно зависит от внешних факторов (пыли, влаги, температуры). Герконы же имеют большие размеры по сравнению с датчиком Холла, что существенно влияет на габариты конечного устройства.

Датчик Холла – это прибор, который регистрирует изменение величины магнитной индукции поля. Датчик может быть аналоговым и цифровым, при этом цифровые датчики делятся на униполярные и биполярные датчики [16]. В данной работе было решено использовать аналоговый датчик Холла, так как он выдает сигнал напряжения пропорциональный величине магнитной индукции поля, создаваемого магнитным винилом, биполярный же датчик выдает сигнал о наличии поля с величиной магнитной индукции, превышающей порог срабатывания датчика. В качестве датчика Холла был выбран наиболее распространенный и дешевый датчик SS49E.

#### **2.1.2.1 Методика определения конечных положений**

Методика определения конечных положений заключается в изменении сигнала от датчика Холла при приближении магнитной зоны нити к датчику. В роли магнитных зон выступает магнитный винил, наклеенный на определенных участках нити.

Изначально, предполагалось фиксировать конечные положения, используя только один датчик Холла, при этом размеры магнитных зон должны были отличаться размерами, влияя на величину магнитной индукции, соз-

даваемой этой зоной. При этом контроллер сравнивает значение, полученное от датчика Холла, с пороговой величиной и выдает реакцию при её превышении. В качестве метки была выбрана полоска магнитного винила с размерами 12,7x25,4x0,6 мм, которая была наклеена вдоль диаметра провода, образуя кольцо.

В ходе эксперимента было выяснено, что при перемещении кольца вдоль датчика, как это показано на рисунке 22, данные от датчика менялись от минус 200 до 200 Гс, ввиду того, что при изготовлении магнитного винила его одна сторона намагничивается так, чтобы относительно его поверхности силовые линии магнитного поля располагались параллельно. За счет чередования магнитных полюсов (примерно 5 полюсов на сантиметр) создает магнитный эффект, который позволяет материалу надежно крепиться к притягивающим гладким поверхностям, в основном из магнитных металлов.

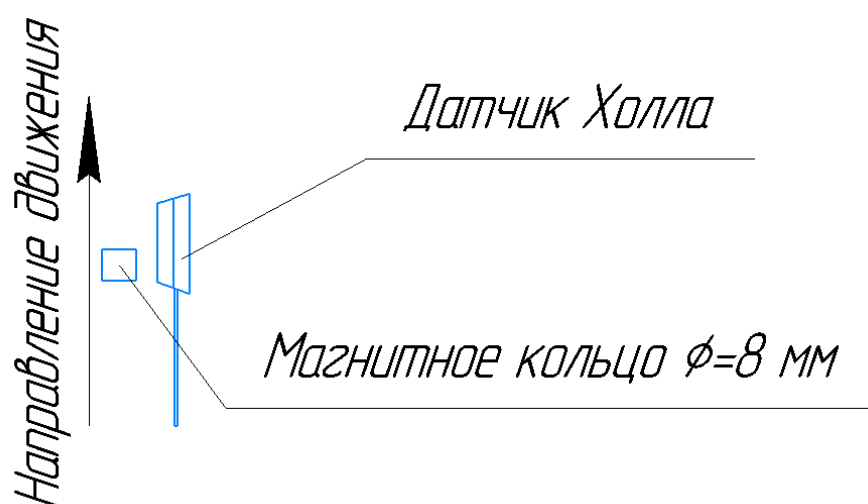


Рисунок 22 – Перемещение магнитного кольца вдоль датчика Холла

По этой причине невозможно использовать алгоритм, который бы сравнивал данные с датчика Холла с пороговым, так как данные от датчика постоянно изменяются, ввиду особенностей производства винила [17]. Кроме того, в ходе проведения вышеприведенного эксперимента, было выяснено, что расстояние между магнитной меткой и датчиком не должно превышать 5 мм. Поэтому было принято решение, фиксировать конечные, положения используя два датчика Холла, которые расположены так, как это представлено на рисунке 23.

Методика заключается в следующем: в двух зонах провода на половину окружности наклеиваются полоски магнитного винила так, как это показано на рисунке 23. Каждый датчик Холла реагирует на свою магнитную метку, которая определяет одно из положений, что было проверено в ходе нового эксперимента. Алгоритм определения наличия магнитного поля вблизи датчика основывается на его характеристике, представленной на рисунке 24 [18].

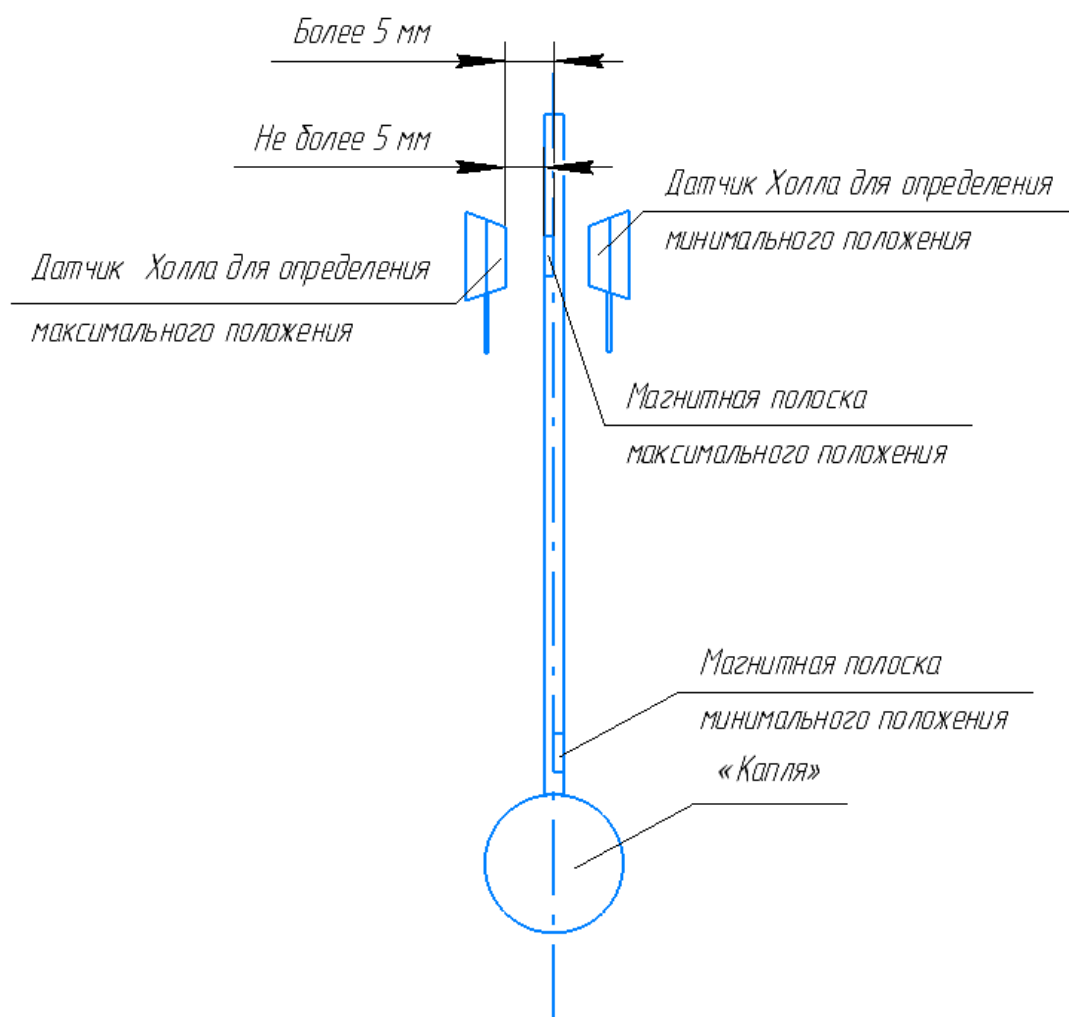


Рисунок 23 – Определение крайних положений капли

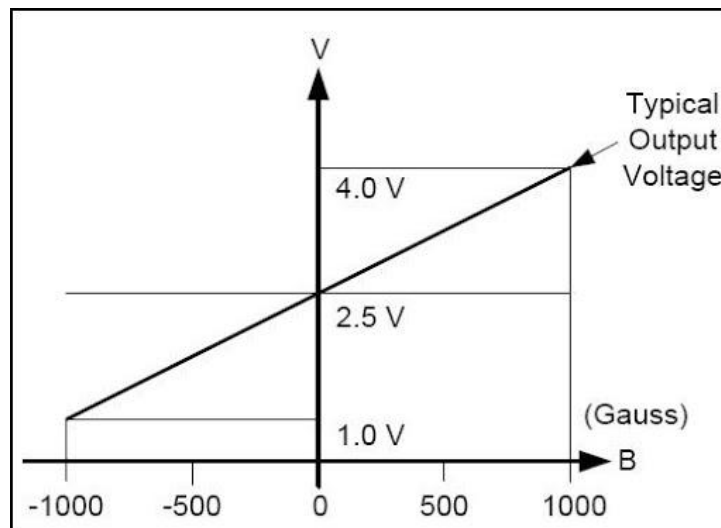


Рисунок 24 – Характеристика датчика Холла SS49E

На рисунке 24 показано, что отсутствие магнитного поля соответствует напряжению 2,5 В на выходе датчика. Следовательно, можно считать, что любое отклонение выходного напряжения датчика на  $\pm 5\%$  свидетельствует о наличии магнитного поля вблизи датчика. Окончательный алгоритм определения крайних положений “капли” заключается в следующем:

- проверка наличия магнитного поля вблизи датчиков Холла;
- если датчик Холла 1 фиксирует магнитное поле, а 2-ой, то “капля” находится в максимальном положении;
- если магнитное поле фиксирует только 2-ой датчик, то “капля” – в минимальном положении;
- в любой другой ситуации “капля” находится в промежуточном положении.

Однако в случае перекручивания нити в процессе работы, данный алгоритм будет работать неправильно, чтобы избежать такой ситуации необходимо предусмотреть наличие сужающего устройства на выходе нити из корпуса устройства в качестве направляющей. Кроме того, для исключения такой ситуации нить должна быть всегда натянутой.

### 2.1.3 Сетевой адаптер

На сегодняшний день для присоединения микроконтроллеров к сети Ethernet существуют два основных сетевых адаптера: W5500 и ENC28J60. Их основные характеристики представлены в таблице 7 [19, 20].

Таблица 7 – Сравнительные характеристики сетевых адаптеров

	W5500	ENC28J60
Интерфейс подключения	SPI	SPI
Емкость буфера приема/передачи, Кбайт	32	8
Режимы передачи данных	Full Duplex, Half-Duplex	Full Duplex, Half-Duplex
Скорость Ethernet, Гб/с	10, 100	10
Напряжение питания, В	3,3	3,3
Реализация протокола TCP/IP	аппаратная	программная
Стоимость, руб.	230	146

Исходя из данных, представленных в таблице 7, было принято решение использовать сетевой адаптер W5500, так как он имеет большую емкость буфера приема/передачи, поддерживает Ethernet 10 BASE-T, 100 BASE-T, а также имеет аппаратную реализацию протокола TCP/IP, что не требует подключения дополнительных библиотек, значительно уменьшая размер программного кода микроконтроллера исполнительного устройства. Внешний вид сетевого адаптера W5500 представлен на рисунке 25.



Рисунок 25 – Внешний вид адаптера W5500

Использование такого адаптера приводит к увеличению габаритных размеров печатной платы устройства, что противоречит требованию к системе о компактности элементов системы, поэтому было решено использовать дру-

гую версию данного адаптера с меньшими габаритными размерами, внешний вид которой представлен на рисунке 26.



Рисунок 26 – Внешний вид адаптера USB-ES1 W5500

Данный сетевой адаптер также используется в составе сервера управления.

#### **2.1.4 RGB-светодиод**

RGB-светодиод – это три одноцветных кристалла совмещенные в одном корпусе.

Существуют два варианта управления RGB-светодиодами:

1. управление с помощью ШИМ-сигнала с контроллера;
2. управление с помощью контроллера, который сам генерирует необходимый ШИМ-сигнал.

Так как в сигнал для светодиода “капли” проходит через длинный провод, на котором установлены магниты, то ШИМ-сигнал от контроллера управления может искажаться. Поэтому было решено использовать RGB-светодиоды WS2812b. В состав светодиода входит микросхема, которая генерирует ШИМ-сигнал на основе входных данных, передаваемых от микроконтроллера. Внешний вид светодиода представлен на рисунке 27.

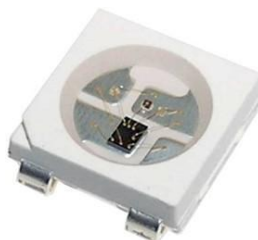


Рисунок 27 – Внешний вид светодиода WS2812b



### 2.1.5 Выбор микроконтроллера

В настоящее время существует большое количество различных платформ для разработки устройств управления. К таким устройствам относятся:

- одноплатные компьютеры;
- микроконтроллеры и отладочные платы на их базе;
- программируемые интегральные логические схемы (ПЛИС).

Использование готовых отладочных плат на базе микроконтроллеров, одноплатных компьютеров и ПЛИС в данной работе не целесообразно, так как эти устройства обладают значительными габаритными размерами, ввиду наличия большого количества, не всегда используемой, встроенной периферии, что не удовлетворяет требованию к системе о компактности конечных устройств. Также такие устройства обладают большим энергопотреблением. Поэтому для управления исполнительным устройством было решено разработать собственную плату на базе микроконтроллера, которая обладает необходимым количеством периферии, обеспечивающей необходимую работоспособность. Далее были сформированы необходимые требования к микроконтроллеру и произведен его выбор.

Для управления исполнительным устройством необходим микроконтроллер, который имеет небольшие количество входов/выходов и стоимость. Также необходима поддержка интерфейса SPI, UART. Другим требованием было наличие памяти программ от 32 кбайт, так как минимум 16 кбайт займет встроенный загрузчик. Также микроконтроллер должен иметь ширину шины данных 32 бит для обеспечения быстрой передачи данных от периферии к микроконтроллеру. В таблице 8 приведены сравнительные характеристики подходящих микроконтроллеров различных производителей [21].

Таблица 8 – Сравнительные характеристики микроконтроллеров

Наименование	GD32F130G8U6	STM32F030C8T6	STM32F103C8T6	STM32F302CBT6
Производитель	GigaDevices	ST Microelectronics		

Продолжение таблицы 8 – Сравнительные характеристики микроконтроллеров

Наименование	GD32F130G 8U6	STM32F03 0C8T6	STM32F103 C8T6	STM32F302 CBT6
Тактовая частота, МГц	48	48	72	72
Ширина шины дан- ных, бит	32	32	32	32
Количество вхо- дов/выходов	23	39	37	37
Объем памяти про- грамм, Кбайт	64	64	64	128
Периферия	SPI, UART, I2C		I2C, CAN, SPI, UART, USB	
Напряжение питания, В	2 – 3,6	2 – 3,6	2 – 3,6	2 – 3,6
Стоимость, руб.	35	91	140	230
Стоимость програм- матора, руб.	120	120	120	120

Исходя из данных, приведенных в таблице 8, было принято решение использовать микроконтроллер STM32F103C8T6, так как он обладает сравнительно небольшим количеством входов/выходов, достаточным объемом памяти программ и имеет невысокую себестоимость. Также достоинством данного микроконтроллера является тактовая частота 72 МГц, что позволит быстро обрабатывать входящие запросы и выполнять требуемые операции.

Микроконтроллер GD32F130C8T6 является удешевленной копией STM32F030C8T6, однако микроконтроллер производства ST Microelectronics имеет больше документации по программированию и использованию. На данный момент в качестве экспериментального контроллера используется отладочная плата на базе микроконтроллера STM32F103C8T6.

### 2.1.6 Структурная схема макета исполнительного устройства

В результате подбора элементов исполнительного устройства, для создания макета было решено использовать следующие компоненты:

– отладочная плата на базе микроконтроллера STM32F103C8T6;

- Ethernet – адаптер W5500;
- датчики Холла SS49E;
- RGB-светодиоды WS2812b;
- шаговый двигатель 28BYJ-48 с драйвером ULN2003.

Схема макета представлена на рисунке 28.

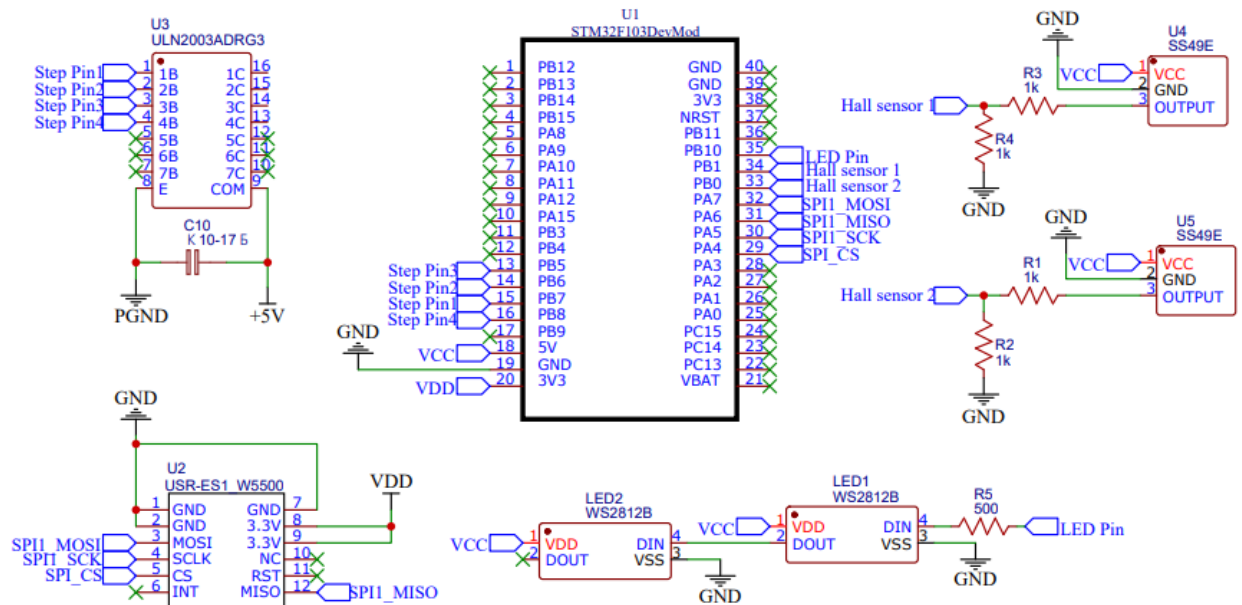


Рисунок 28 – Схема макета исполнительного устройства

В приведенной выше схеме для шагового двигателя предусмотрен внешний источник питания с напряжением 5 В для шагового двигателя, так как отладочная плата на базе микроконтроллера STM32F103C8T6 выдает не более 500 миллиампер на выходе 5V, чего недостаточно при условии подключения к этому выходу RGB-светодиодов и датчиков Холла. Кроме того, ввиду того, что датчики Холла могут выдавать до 5 В на выходе при максимальном входном напряжении микроконтроллера 3,3 В, были установлены резистивные делители напряжения между информационным выходом датчиков Холла и входами микроконтроллера. Коэффициент деления равен 1/2. Использование такого делителя ограничит максимальное напряжение на входе микроконтроллера до 2,5 В. Внешний вид макета исполнительного устройства представлен на рисунке 29.

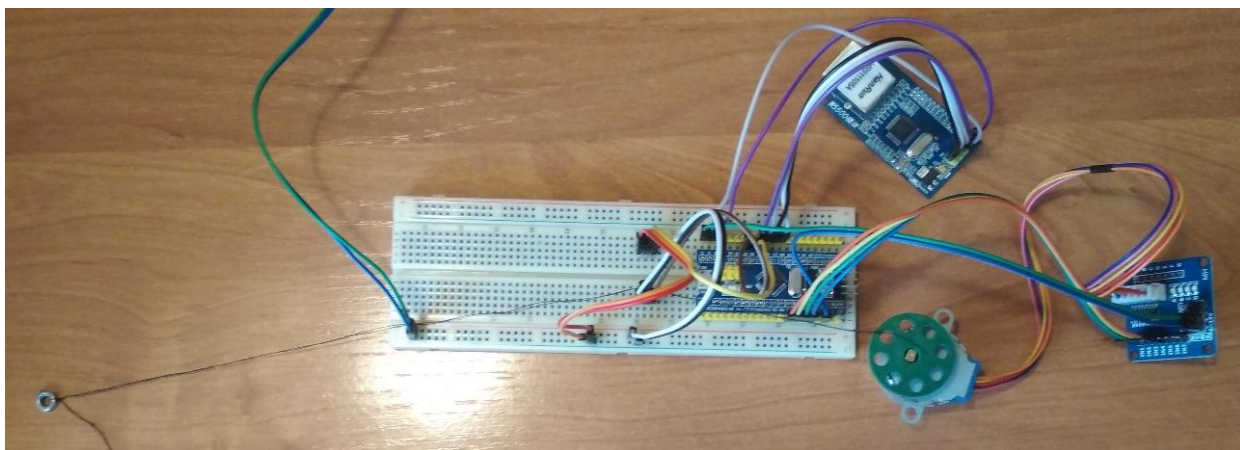


Рисунок 29 – Макет исполнительного устройства

В качестве экспериментальной катушки был использован шкив диаметром 3 см, на который была намотана нить с грузом, в качестве которого была использована гайка. Данный макет был применен для проверки алгоритмов логики устройства. Далее на основе данного макета была разработана печатная плата исполнительного устройства.

### **2.1.7 Разработка печатной платы исполнительного устройства**

В результате подбора элементов для создания исполнительного устройства конечной системы было решено использовать следующие компоненты:

- микроконтроллер STM32F103C8T6;
- Ethernet – адаптер W5500;
- датчики Холла SS49E;
- RGB-светодиоды WS2812b;
- шаговый двигатель Nema 17 с драйвером A4988.

С учетом выявленных в ходе экспериментов замечаний к устройству была доработана электрическая схема устройства, внешний вид которой представлен на рисунке 30. На основе электрической схемы, была разработана печатная плата устройства, внешний вид которой представлен на рисунке 31.

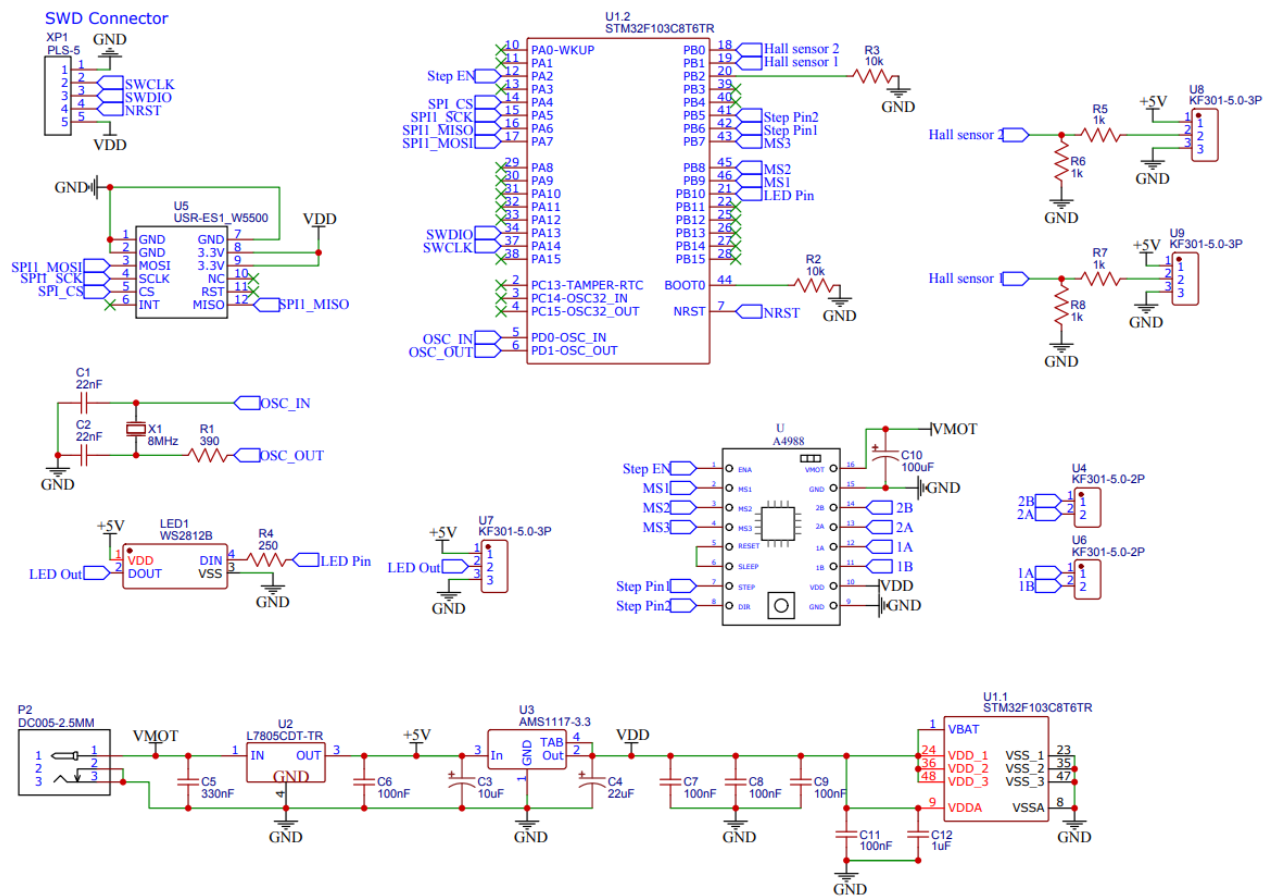


Рисунок 30 – Электрическая схема исполнительного устройства

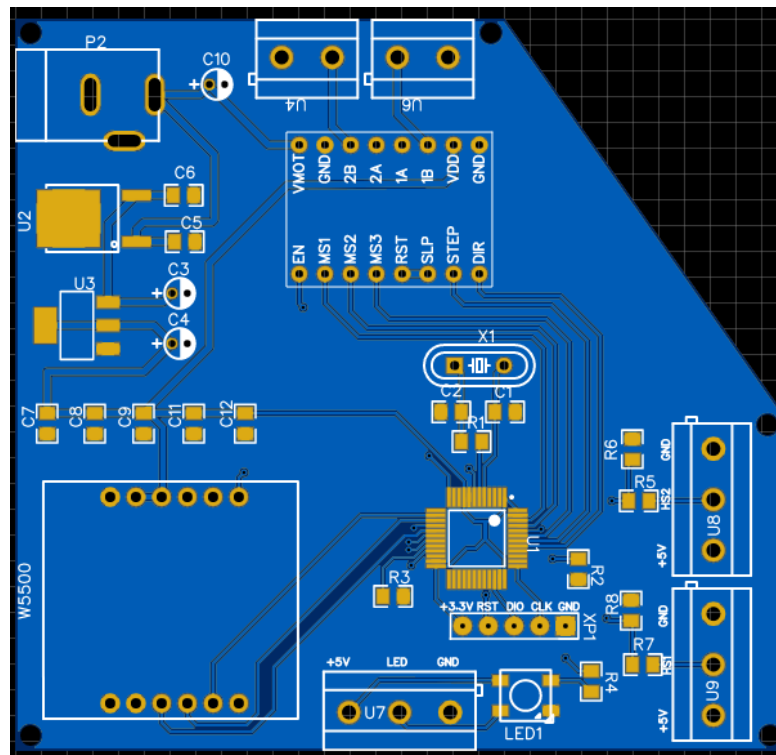


Рисунок 31 – Внешний вид печатной платы устройства

Напряжение питания устройства составляет от 12 до 24 В. В качестве источника питания можно использовать любой адаптер с выходным штекером 5,5х2,1 мм. В будущем возможна переразводка платы с учетом необходимого для устройства корпуса и расположения в нем составляющих устройства.

## 2.2 Сервер управления

Сервер управления предназначен для передачи данных о поверхности исполнительным устройствам, а также сбора информации о состоянии этих устройств.

На основе вышесказанного, а также требований к системе, представленных в главе 1, сервер управления должно включать в себя:

- встроенный загрузчик (“бутлоадер”);
- адаптер USB – RS-232;
- RGB-светодиод для отображения состояния работы устройства;
- Ethernet – адаптер.

Ethernet – адаптер и RGB-светодиод были выбраны в пунктах 2.1.3 и 2.1.4 соответственно.

## 2.3 Адаптер USB – RS-232

Для обмена данными между сервером управления и ПК с использованием интерфейса RS-232, микроконтроллер сервера должен содержать адаптер USB – RS-232, для более удобного подключения к ПК. На сегодняшний день для целей в основном используют адаптеры на базе микросхем PL2303, CP2102 и CH340. Их основные характеристики представлены в таблице 9 [22].

Таблица 9 – Сравнительные характеристики адаптеров

	PL2303	CP2102	CH340
Стандарт USB	2.0	2.0	2.0
Ток потребления, мА	10	20	30
Максимальная скорость передачи, Мб/с	6	1	2

Продолжение таблицы 9 – Сравнительные характеристики адаптеров

	PL2303	CP2102	CH340
Напряжение питания, В	3,6 – 5,5	3 – 3,6	3,3 - 5
Стоимость, руб.	120	140	170

Исходя из данных, представленных в таблице 9, было принято решение использовать микросхему PL2303, так как он обладает меньшей стоимостью и током потребления. Для создания макета было решено использовать готовый адаптер на базе PL2303.

## 2.4 Выбор микроконтроллера

Для управления сервером было также решено разработать собственную плату на базе микроконтроллера. Далее были сформулированы требования и осуществлен выбор микроконтроллера. Микроконтроллер должен обладать небольшим количеством входов/выходов и стоимостью. Также необходима поддержка интерфейса SPI, UART. Другим требованием является большая, чем у микроконтроллера устройства управления тактовая частота, то есть более 72 МГц, так как необходимо быстро обрабатывать большие объемы данных. Также микроконтроллер должен иметь ширину шины данных 32 бит для обеспечения быстрой передачи данных от периферии к микроконтроллеру. В таблице 10 приведены сравнительные характеристики подходящих микроконтроллеров различных производителей [21].

Таблица 10 – Характеристики микроконтроллера

Наименование	GD32F207Z ET6	LPC1754FB D80	STM32F205R ET6
Производитель	GigaDevices	NXP	ST Microelectronics
Тактовая частота, МГц	120	100	120
Ширина шины данных, бит	32		
Количество входов/выходов	114	52	51
Объем памяти программ, Кбайт	512	128	512
Периферия	I2C, CAN, SPI, ETH, UART, USB	I2C, CAN, SPI, UART, USB	Периферия

Продолжение таблицы 10 – Характеристики микроконтроллера

Наименование	GD32F207ZET6	LPC1754FBD80	
Напряжение питания, В	2 – 3,6	2,4 – 3,6	1,8 – 3,6
Стоимость, руб.	220	410	440
Стоимость программатора, руб.	120	120	120

Исходя из данных, приведенных в таблице 10, было принято решение использовать микроконтроллер STM32F205RET6, так как он обладает сравнительно небольшим количеством входов/выходов и большим объемом памяти программ. Также достоинством данного микроконтроллера является тактовая частота 120 МГц, что позволит быстро обрабатывать входящие запросы и выполнять требуемые операции. Микроконтроллер GD32F207ZET6 является удешевленной копией STM32F205RET6, однако микроконтроллер производства ST Microelectronics имеет больше документации по программированию и использованию. На данный момент в качестве экспериментального контроллера используется отладочная плата на базе микроконтроллера STM32F103C8T6.

## 2.5 Структурная схема макета сервера управления

В результате подбора элементов сервера управления для макета было решено использовать следующие компоненты:

- отладочная плата на базе микроконтроллера STM32F103C8T6;
- Ethernet – адаптер W5500;
- RGB-светодиод WS2812b;
- адаптер USB – RS-232.

Схема макета представлена на рисунке 32.





## 2.6 Разработка печатной платы сервера управления

В результате подбора элементов для создания сервера управления конечной системы было решено использовать следующие компоненты:

- микроконтроллер STM32F205RET6;
- Ethernet – адаптер W5500;
- RGB-светодиоды WS2812b;
- адаптер USB – RS-232.

Используя в качестве основы схему макета сервера, была разработана электрическая схема, внешний вид которой представлен на рисунке 34.

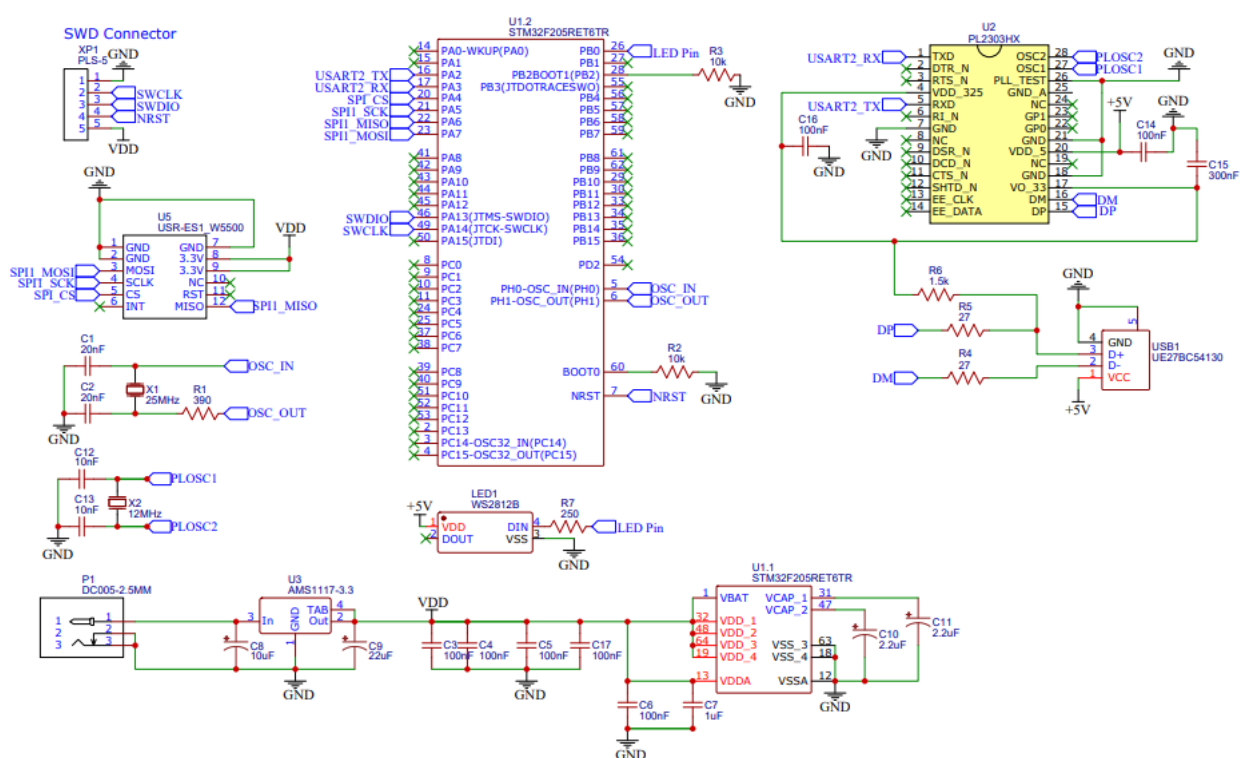


Рисунок 34 – Электрическая схема сервера управления

Напряжение питания устройства составляет от 5 до 15 В. В качестве источника питания можно использовать любой адаптер с выходным штекером 5,5x2,1 мм. На основе вышеприведенной схемы, была разработана печатная плата устройства, внешний вид которой представлен на рисунке 35. Ввиду небольшого количества элементов, все они были размещены на верхнем слое платы.

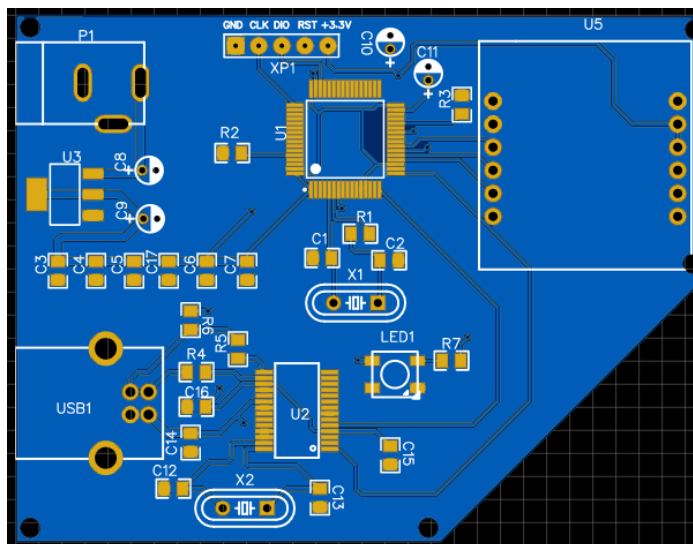


Рисунок 35 – Печатная плата сервера управления

В будущем возможна переразводка платы с учетом необходимого для устройства корпуса и расположения в нем компонентов сервера.

## 2.7 Вывод по главе 2

В настоящей главе были сформированы принципиальные схемы исполнительно устройства и сервера управления, обоснованно подобраны компоненты, собраны макеты и разработаны печатные платы этих устройств.

В отличие от существующих технических решений, спроектированы узлы системы, основанные на микроконтроллерах серии STM32, имеет модульную структуру, что позволит при необходимости в будущем легко модифицировать программно-аппаратную часть устройств.

### **3 Разработка программного обеспечения устройств системы**

В данной главе представлены алгоритмы, формирующие логику работы исполнительного устройства и сервера управления, а также протоколы взаимодействия между устройствами сети.

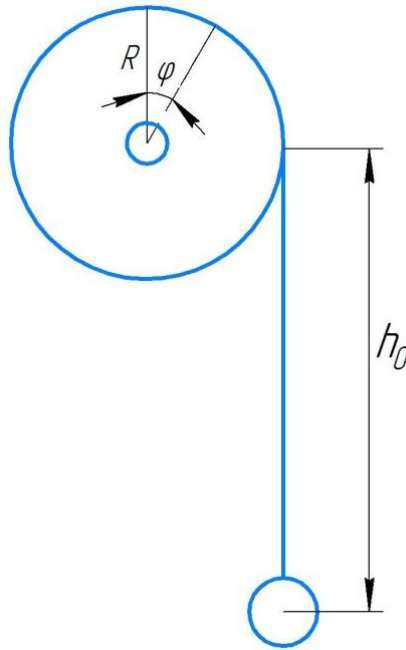
#### **3.1 Описание логики работы исполнительного устройства**

Основными процессами, выполняемыми микроконтроллером устройства, являются:

- обмен данными с Ethernet – адаптером по интерфейсу SPI;
- управление шаговым двигателем на основе полученных данных от сервера управления;
- цветовая индикация состояния работы устройства;
- отображение цвета “капли”.

##### **3.1.1 Управление двигателем**

Исполнительное устройство получает необходимые данные о заданных координате и скорости перемещения, на основании которых формируются необходимые импульсы для шагового двигателя. Для перемещения “капли дождя” было необходимо пересчитать заданные линейные перемещения в количество шагов, которые должен совершить шаговый двигатель за определенный промежуток времени. Пусть необходимо переместить объект из положения  $h_0$  в заданное математической моделью движения положение  $h$  со скоростью  $v$  (рисунок 36).



$\varphi$  – угловой шаг двигателя, °;  $R$  – радиус катушки, м;  $h_0$  – исходное положение, м

Рисунок 36 – Перемещение объекта шаговым двигателем

Далее была рассчитана длина провода, который наматывается (разматывается) за один полный оборот двигателя, которая выражается как длина окружности катушки:

$$L = 2 \cdot \pi \cdot R. \quad (11)$$

где  $R$  – радиус катушки, м.

Количество шагов, совершаемых двигателем за один оборот, определяется по формуле:

$$N_{full} = \frac{360}{\varphi}. \quad (12)$$

где  $\varphi$  – угловой шаг двигателя, °.

Исходя из формулы (5), было получено время перемещения объекта в заданную точку:

$$t = \frac{\Delta h}{v}. \quad (13)$$

где  $\Delta h = h - h_0$  - расстояние до заданной координаты, м.

Затем, исходя из условий, что при совершении одного полного оборота (количество шагов двигателя определяется формулой (12)) на катушку наматывается (разматывается) длина провода, определяемая формулой (11), то для намотки (размотки) длины провода, устанавливаемой формулами (5) и (13), необходимо с помощью двигателя совершить количество шагов, используя выражение:

$$N_x = \frac{\Delta h \cdot 360}{\varphi \cdot L}. \quad (14)$$

С учетом (11) формула (14) примет вид:

$$N_x = \frac{\Delta h \cdot 360}{\varphi \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}. \quad (15)$$

Далее, на основании выражений (13) и (15), было получено выражение, определяющее интервал времени переключения между обмотками:

$$\tau = \frac{t}{N_x} = \frac{\Delta h \cdot \varphi \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}{v \cdot \Delta h \cdot 360} = \frac{\varphi \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}{v \cdot 360}. \quad (16)$$

Формулы (15) и (16) могут быть применены только для полношагового режима работы двигателя, при других режимах работы, описанных в пункте 2.1.1.2, необходимо разделить количество шагов и умножить интервал времени между обмотками, полученные по этим формулам, на коэффициент дробления шага.

### **3.1.2 Протокол обмена данными между исполнительным устройством и сервером управления**

Обмен данными в локальной сети осуществляется с помощью интерфейса Ethernet, реализованного с помощью адаптеров W5500. Данные адаптеры позволяют передавать пакеты, используя для адресации MAC-адреса.

В качестве протокола передачи данных в составе Ethernet-фрейма (рисунок 37), было решено использовать PDU часть протокола Modbus RTU (рисунок 38), ввиду его широкого применения в промышленности для связи между электронными устройствами [23].

Преамбула	Флаг начала	Адрес получателя	Адрес отправителя	Тип	Данные	CRC
7 байт	1 байт	6 байт	6 байт	2 байт	46...1500 байт	4 байт

Рисунок 37 – Структура Ethernet-фрейма

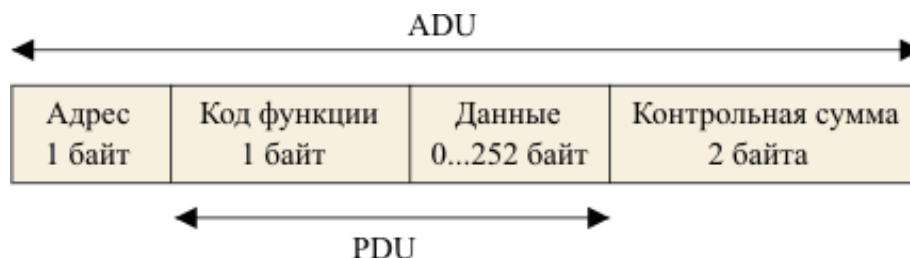


Рисунок 38 – Формат кадров протокола Modbus

С учетом этого поле данных Ethernet-фрейма будет включать:

- код функции – команда чтения или записи необходимых полей данных;
- данные – необходимая информация для реализации команды.

Протокол Modbus имеет следующие поля данных:

- Discrete Inputs — дискретные входы устройства, доступны только для чтения;
- Coils — дискретные выходы устройства, или внутренние значения. Доступны для чтения и записи;

- Input Registers — 16-битные входы устройства. Доступны только для чтения;

- Holding Registers — 16-битные выходы устройства, либо внутренние значения. Доступны для чтения и записи.

В данной работе в качестве полей данных используются только Input и Holding регистры. Обмен данными с выбранными выше полями данных осуществляется с использованием четырех типов команд:

- 0x04 READ INPUT REGISTERS – чтение входных регистров;
- 0x03 READ HOLDING REGISTERS – чтение регистров хранения;
- 0x06 WRITE ONE HOLDING REGISTER – запись одного регистра хранения;

• 0x10 WRITE HOLDING REGISTERS – запись нескольких регистров хранения.

В таблицах 11 и 12 представлены данные Input и Holding регистров соответственно.

Таблица 11 – Input регистры исполнительного устройства

Адрес	Назначение регистра		Доступ
	Бит	Назначение	
0	<b>Регистр состояния</b>		<b>R</b>
	0	0 – связь с Ethernet-адаптером отсутствует; 1 – связь с Ethernet-адаптером присутствует.	
	1	0 – связь с датчиком Холла 1 отсутствует; 1 – связь с датчиком Холла 1 присутствует.	
	2	0 – связь с датчиком Холла 2 отсутствует; 1 – связь с датчиком Холла 2 присутствует.	
	3	0 – шаговый двигатель неисправен; 1 – шаговый двигатель исправен.	
	4	0 – устройство сконфигурировано; 1 – ошибка конфигурации.	
	5-15	(резерв)	
1	<b>Регистр текущей координаты</b>		<b>R</b>
	0-15	текущая координата устройства, см	
2	<b>Регистр текущей скорости перемещения</b>		<b>R</b>
	0-15	текущая скорость перемещения, см/с	

Таблица 12 – Holding регистры исполнительного устройства

Адрес	Назначение регистра		Доступ
	Бит	Назначение	
0 - 2	<b>Регистр MAC-адреса</b>		<b>R/W</b>
	0-15	MAC адрес устройства	
3	<b>Регистр координаты перемещения</b>		<b>R/W</b>
	0-15	координата перемещения, см	
4	<b>Регистр скорости перемещения</b>		<b>R/W</b>
	0-15	скорость перемещения, см/с	
5 - 6	<b>Регистр цвета светодиода</b>		<b>R/W</b>
	0-15	цвет светодиода (RGB)	



Продолжение таблицы 12 – Holding регистры исполнительного устройства

Адрес	Назначение регистра		Доступ
	Бит	Назначение	
7	Регистр управления устройством		R/W
	0	0 – остановить перемещение “капли”; 1 – начать перемещение “капли”	
	1	0 – работа по алгоритму; 1 – переместить “каплю” в нулевое положение	
	2	0 – работа по алгоритму; 1 – провести самодиагностику.	
	3-15	(резерв)	

После обработки каждого принятого запроса, устройство отправляет ответный Ethernet-фрейм, который включает в себя следующие данные в поле данных:

- код принятой в запросе функции;
- код ошибки.

Код ошибки может принимать следующие значения:

- 0x00 – нет ошибок;
- 0x01 – принятый код функции не может быть обработан;
- 0x02 – адрес данных, указанный в запросе, не доступен;
- 0x03 – величина, устанавливаемая в регистр недоступна.

Далее была определена минимальная скорость передачи данных между сервером и исполнительным устройством. Для этого был определен минимальный набор данных, на основе информации представленной на рисунке 37 и в таблице 12, который нужно передать от сервера одному исполнительному устройству:

- служебная информации Ethernet-фрейма – 64 байт;
- координата для перемещения “капли” – 2 байта;
- скорость перемещения “капли” – 2 байта;
- цвет RGB-светодиода – 4 байта;
- контрольная сумма CRC – 4 байта.

Итого 76 байт данных.

При частоте воспроизведения 10 – 25 Гц необходимо передавать данные одному исполнительному устройству каждые 40 – 100 мс. Скорость передачи данных по линии связи вычисляется по формуле:

$$v = \frac{Q}{t}, \quad (17)$$

где  $Q$  – количество данных, бит;  
 $t$  – время передачи данных, с.

Исходя из формулы (17), была получена минимальная скорость передачи данных:

$$v = \frac{76 \cdot 8 \cdot 1000}{40} = 15200 \text{ бит/с} = 15,2 \text{ Кбит/с};$$

Следовательно, скорость для передачи информации между сервером и исполнительным устройством должна быть больше или равна 15,2 Кбит/с, что обеспечивается выбранным в пункте 2.1.3 сетевым адаптером.

### **3.2 Описание логики работы сервера управления**

Основными процессами, выполняемыми микроконтроллером сервера, являются:

- обмен данными с диспетчерской станцией по интерфейсу RS-232, согласно протоколу обмена;
- передача данным устройствам локальной сети через определенные промежутки времени;
- составление отчета о состоянии работы подчиненных устройств;
- цветовая индикация состояния работы устройства.

#### **3.2.1 Передача и прием данных в режиме реального времени**

Ввиду необходимости оперативного управления исполнительными устройствами сети и осуществления своевременной реакции на запросы ПК в условиях реального времени, было решено использовать при разработке ПО микроконтроллера операционную систему реального времени Free RTOS. Данная

ОС была выбрана из соображений ее популярности, наличия большого количества всей необходимой документации и примеров реализации для различных платформ, а также стоимости (данная ОС является бесплатной) [24].

Для организации работы системы сервер управления получает весь необходимый набор данных для работы исполнительных устройств. Затем сервер поочередно взаимодействует с каждым исполнительным устройством, выделяя для взаимодействия квант времени равный 6 мс. За это время сервер должен передать сообщение устройству, которое в свою очередь после обработки сообщения отправит ответ. Значение кванта времени было рассчитано из следующих соображений:

- время передачи сообщений от сервера при скорости 10 Мбит/с для установки всех параметров исполнительного устройства (необходимо передать 76 байт данных), согласно формуле (17), составляет 60,8 микросекунды;
- время передачи сообщения от исполнительного устройства серверу управления (66 байт данных), согласно формуле (17), составляет 52,8 микросекунд;
- время обработки принятых данных исполнительным устройством, составляет 5 миллисекунд (в ходе экспериментов).

Суммарное время одной попытки передать сообщение составляет примерно 6 миллисекунд. Для передачи сообщения от сервера исполнительному устройству выделяется 3 попытки, то есть 18 миллисекунд. Такое временное разделение позволяет снизить вероятность возникновения коллизий в сети. Если по истечению кванта времени передачи данных сервер не получил ответа от исполнительного устройства, то сервер фиксирует отсутствие связи с этим устройством и передает текущие данные следующему устройству. Такое решение позволяет сохранять целостность инсталляции при выходе из строя некоторых компонентов.

Другой более приоритетной задачей является обработка данных от ПК (генератора поверхности). Каждые 10 миллисекунд происходит проверка нали-

чия нового сообщения в буфере, по результатам которой сообщение, если оно есть обрабатывается, при этом останавливаются другие процессы, которые возобновляются с точки останова после обработки сообщения.

### 3.2.2 Протокол обмена данными между сервером управления и генератором поверхности

Ввиду того, что для обмена данными между сервером управления и ПК, с установленной программой для генерации поверхности, используется интерфейс RS-232, было решено использовать в качестве протокола связи протокол Modbus RTU. Описание данного протокола представлено в пункте 3.1.2 данной главы. В таблицах 13 и 14 представлены данные Input и Holding регистров соответственно.

Таблица 13 – Input регистры сервера управления

Адрес	Назначение регистра		Доступ
	Бит	Назначение	
0	<b>Регистр состояния</b>		<b>R</b>
	0	0 – связь с Ethernet-адаптером отсутствует; 1 – связь с Ethernet-адаптером присутствует.	
	2	0 – устройство сконфигурировано; 1 – ошибка конфигурации.	
	3-15	(резерв)	
1-16	<b>Регистр наличия связей с устройствами сети</b>		<b>R</b>
	0-15	Каждый бит представляет отдельное устройство 0 – связь с устройством отсутствует; 1 – связь с устройством присутствует.	
17 - 1040	<b>Регистры состояния исполнительных устройств</b>		<b>R</b>
	0-15	значение регистра состояния	

Таблица 14 – Holding регистры сервера управления

Адрес	Назначение регистра		Доступ
	Бит	Назначение	
0 - 2	<b>Регистр MAC-адреса</b>		<b>R/W</b>
	0-15	MAC адрес устройства	

Продолжение таблицы 14 – Holding регистры сервера управления

Адрес	Назначение регистра		Доступ
	Бит	Назначение	
3	<b>Регистр адрес протокола Modbus</b>		<b>R/W</b>
	0-15	значение адреса	
4	<b>Регистр скорости интерфейса RS-232</b>		<b>R/W</b>
	0-15	0 – 9600 бит/с; 1 – 19200 бит/с; 2 – 38400 бит/с; 3 – 115200 бит/с.	
5	<b>Регистр количества подключенных устройств</b>		<b>R/W</b>
	0-15	количество подключенных устройств	
6 - 8197	<b>Holding регистры исполнительных устройств</b>		<b>R/W</b>
	0-15	Holding регистры исполнительных устройств	

В данной работе количество устройств было принято равным 1024 (максимальное количество устройств на одно шине Ethernet). Так как максимальной стандартной скоростью COM-порта ПК является 115200 бит\с, то с учетом (17) для передачи всей информации от компьютера серверу управления (77824 байта данных) потребуется не более 5,4 секунды. После обработки каждого принятого запроса, устройство отправляет ответный фрейм, который включает в себя следующие данные:

- код принятой в запросе функции;
- код ошибки.

Код ошибки может принимать следующие значения:

- 0x00 – нет ошибок;
- 0x01 – принятый код функции не может быть обработан;
- 0x02 – адрес данных, указанный в запросе, не доступен;
- 0x03 – величина, устанавливаемая в регистр недоступна.

### 3.3 Управление RGB-светодиодами

Светодиоды, предназначенные для отображения цвета “капли” и состояния работы устройства, имеет один цифровой вход – DIN, подключенный к

микроконтроллеру. На него подается специальная импульсная последовательность, кодирующая биты, как изображено на рисунке 39.

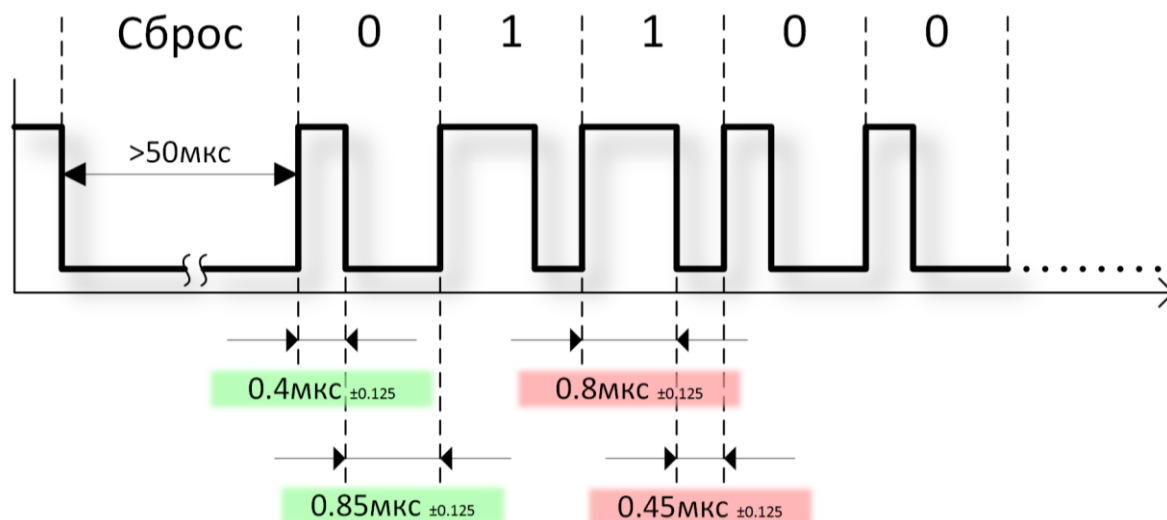


Рисунок 39 – Протокол передачи данных светодиоду

У каждого светодиода есть один цифровой выход – DOUT, который может быть соединен с входом DIN следующего светодиода на полосе, как например, реализовано в исполнительном устройстве. Каждому светодиоду нужно передать 24 бита (по 8 бит на каждый цвет). Всего для управления всей светодиодной полосой нужно передавать 48 бит данных.

Ввиду того, что биты кодируются достаточно короткими импульсами с жесткими допусками, как это указано на рисунке 39, микроконтроллеру, при формировании задержек программным способом требуется запретить все прерывания, во избежание формирования ненужного сброса или бита. Ресурсы процессорного времени при этом расходуются нерационально, например, чтобы зажечь 100 светодиодов, процессору необходимо отработать 3 миллисекунды. Если обновлять состояние светодиодов с частотой 100 Гц, то такой “протокол” заберет 30% процессорного времени [25]. Для высвобождения процессорного времени, было решено использовать присутствующий в микроконтроллерах STM32 механизм прямого доступа к памяти (DMA). В результате чего, все необходимые данные помещаются в специальный буфер, а затем передаются

светодиодам в нужном порядке, при этом микроконтроллер может осуществлять другие процессы.

### **3.4 Встроенный загрузчик**

При начальном проектировании смена программного обеспечения микроконтроллеров основных узлов системы осуществлялась через интерфейс SWD с помощью программатора. Однако такой метод не удобен при эксплуатации, так как необходимо вскрывать устройство и, используя специальные утилиты, осуществлять перепрограммирование. Ввиду наличия большого количества устройств в системе, для упрощения процесса смены программного обеспечения было решено внедрить встроенный загрузчик.

Встроенный загрузчик представляет собой специальную программу, обеспечивающую загрузку основного приложения удобным для пользователя способом. После начала работы микроконтроллера запускается «бутлоадер», с помощью которого удобным способом можно обновить версию программного обеспечения микроконтроллера. Смена программного обеспечения устройства осуществляется через Ethernet – адаптер согласно алгоритму, представленному на рисунке 40.

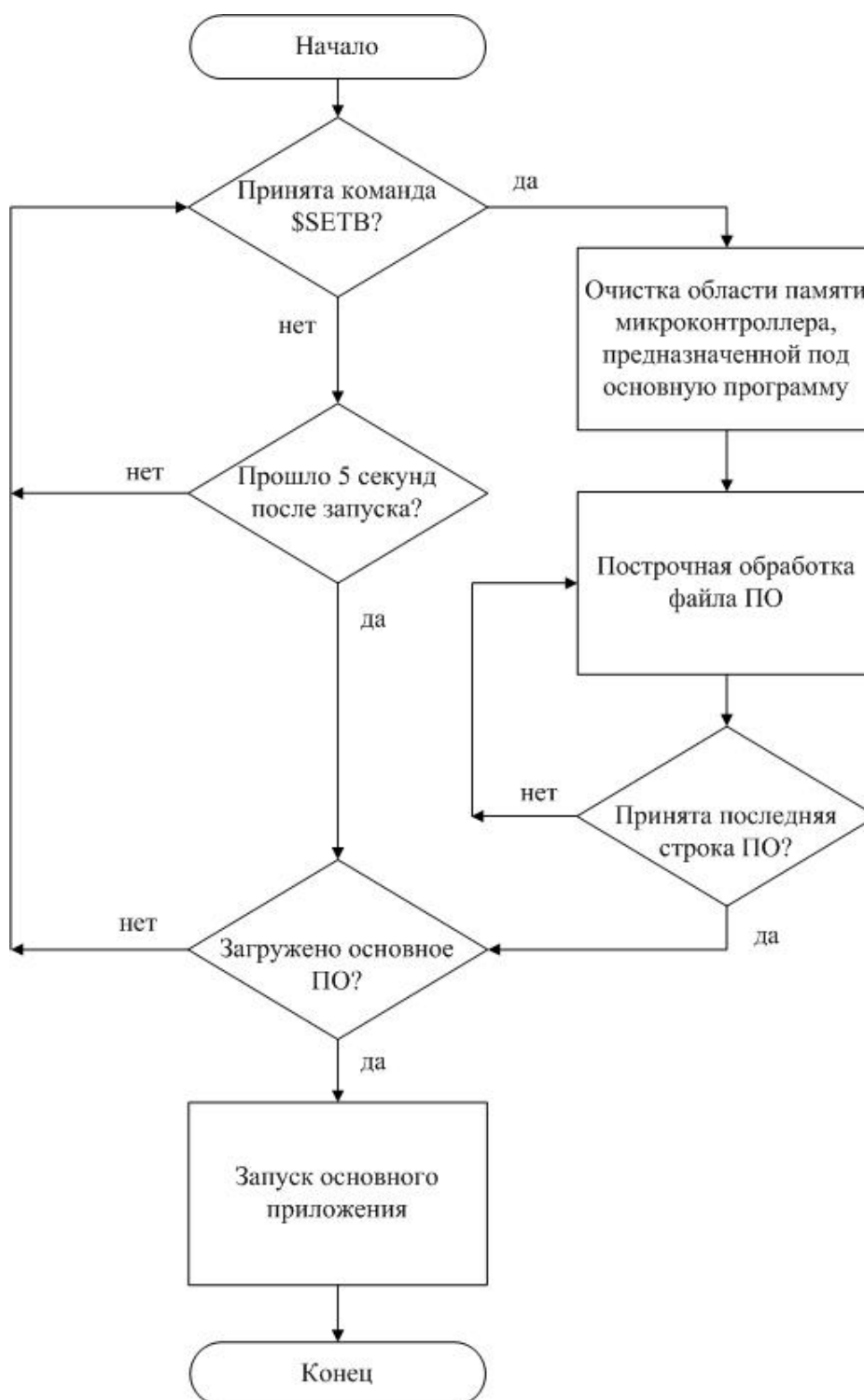


Рисунок 40 – Алгоритм работы встроенного загрузчика

Ввиду того, что некоторые настройки необходимо хранить в памяти микроконтроллера, а при смене программного обеспечения эти настройки могут удалиться, то было решено flash-память микроконтроллеров узлов системы разделить так, как представлено в таблицах 15 [26] и 16 [27].



Таблица 15 – Размещение данных в памяти микроконтроллера исполнительного устройства

Адрес	Номер страницы	Размер страницы, Кб	Назначение
0x08000000 – 0x080027FF	Page 0 - Page 3	2	Размещение программы загрузчика
0x08002000 – 0x080027FF	Page 4		Настройки микроконтроллера
	.		Отступ перед основной программой
0x08003000 – 0x080077FF	Page 6 - Page 30		Размещение основной программы
0x08007800 – 0x08007FFF	Page 31		Резерв

Таблица 16 – Размещение данных в памяти микроконтроллера сервера управления

Адрес	Номер страницы	Размер страницы, Кб	Назначение
0x08000000 – 0x080027FF	Page 0 - Page 3	2	Размещение программы загрузчика
0x08002000 – 0x080067FF	Page 4 – Page 13		Настройки микроконтроллера
	.		Отступ перед основной программой
0x08007000 – 0x0807F7FF	Page 15 - Page 255		Размещение основной программы
0x0807F800 – 0x0807FFFF	Page 256		Резерв

Такое размещение позволяет сохранять в памяти микроконтроллера текущую конфигурацию микроконтроллера (MAC-адрес, настройки Ethernet-адаптер и интерфейса RS-232). Кроме того, в памяти микроконтроллера сервера управления хранятся MAC-адреса всех исполнительных устройств. При включении устройства, после инициализации периферии, осуществляется загрузка параметров из области памяти, содержащей настройки микроконтроллера. Если же данная область пуста, то в эту область загружаются параметры по умол-

чанию (общие для всех устройств) из основной программы, после чего необходимо настроить устройство, используя нужные параметры.

### **3.5 Алгоритм самодиагностики**

#### **3.5.1 Диагностика исполнительного устройства**

Алгоритм самодиагностики в исполнительном устройстве предназначен для определения отказа модулей устройства: шагового двигателя, Ethernet-адаптера и датчика Холла.

Диагностика работы Ethernet-адаптера заключается в запросе данных, закрепленных в регистре, в данном случае MAC-адрес, затем данное значение сравнивается со значением в памяти микроконтроллера, в результате чего выдается реакция при совпадении либо несовпадении значений. Проверка работоспособности шагового двигателя осуществляется после отображения паттерна путем расчета времени движения от текущей точки до нулевого положения с заданной скоростью. Если за этот период времени “капля” не достигла нулевого положения, то выдается реакция о неработоспособности шагового двигателя. Датчики Холла диагностируются наличием нулевого напряжения на выходе датчика.

Отказ любого из модулей влечет за собой останов работы устройства, за исключением работы интерфейса связи, если не отказал Ethernet-адаптер. Реакция микроконтроллера на отказ заключается в заполнении переменной статуса работы, которая сохраняется в памяти микроконтроллера, а также было решено использовать RGB-светодиод для цветовой индикации, который располагается на плате. Режимы работы светодиода представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Режимы работы светодиода исполнительного устройства

Цвет светодиода	Режим работы	Состояние работы
Зеленый	Статичный	Устройство исправно

Продолжение таблицы 17 – Режимы работы светодиода исполнительного устройства

Цвет светодиода	Режим работы	Состояние работы
Красный	Статичный	Отказ Ethernet – адаптера
Красный	Мигающий	Необходима настройка устройства
Синий	Мигающий	Неисправен двигатель или датчик Холла
—	Отключен	Отказ работы микроконтроллера

### 3.5.2 Диагностика сервера управления

Алгоритм самодиагностики сервер управления предназначен для определения потери работоспособности Ethernet – адаптера. Диагностика работы Ethernet-адаптера аналогична алгоритму, приведенному в пункте 3.5.1. Проверка работоспособности адаптера USB – RS-232 в будущем будет осуществляться с помощью Windows-приложения для управления системой.

Отказ Ethernet-адаптера влечет за собой останов работы устройства, за исключением работы интерфейса связи, если не отказал адаптер USB – RS-232. Реакция микроконтроллера на отказ заключается в заполнении переменной статуса работы, которая сохраняется в памяти микроконтроллера, а также в изменении цвета RGB-светодиода, расположенного на плате. Режимы работы светодиода представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Режимы работы сервера управления

Цвет светодиода	Режим работы	Состояние работы
Зеленый	Статичный	Устройство исправно
Красный	Статичный	Отказ Ethernet – адаптера
—	Отключен	Отказ работы микроконтроллера

### 3.6 Проверка полученных алгоритмов на макете системы

На базе макетов исполнительного устройства и сервера управления, представленных на рисунках 29 и 33, был собран макет системы, внешний вид которого представлен на рисунке 41.

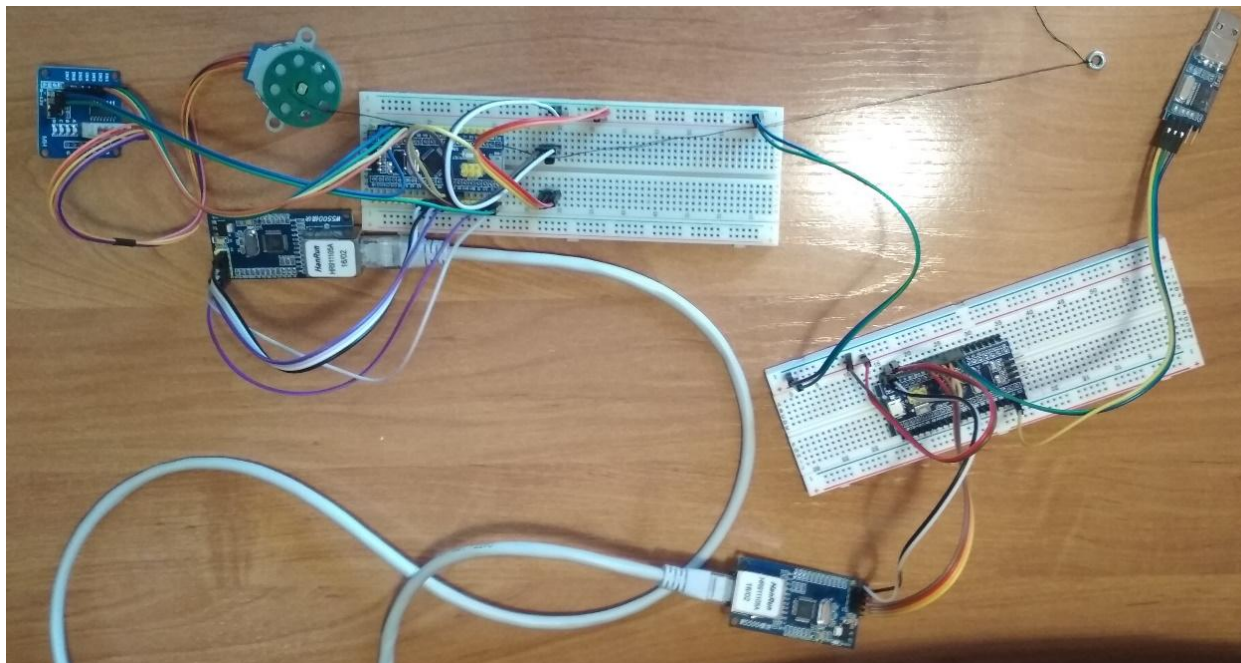


Рисунок 41 – Внешний вид макета системы

Данный макет был использован для проверок алгоритмов взаимодействия между узлами системы. Для проверки был сформирован набор данных для одного объекта системы с помощью скрипта, листинг которого представлен в приложении В. В результате получили два вектора, представленных в таблицах 19 и 20.

Таблица 19 – Фрагмент массива заданных координат на каждом шаге

Номер объекта	Время, с						
	0,01	...	1,75	1,76	1,77	...	100
1	0	...	0	0	0	...	0

Таблица 20 – Фрагмент массива скоростей на каждом шаге

Номер объекта	Время, с						
	0,01	...	1,75	1,76	1,77	...	100
1	0	...	0	0	0	...	0

Полученные данные были добавлены в код сервера управления. Далее сервер управления через каждые 100 мс отправлял данные исполнительному

устройству, в результате чего груз, представленный в виде гайки, перемещался строго по вертикали, повторяя при этом все изгибы траектории заданной функции движения.

### **3.7 Вывод по главе 3**

В настоящей главе были разработаны алгоритмы, формирующие логику работы основных узлов системы, а также протоколы обмена данными в системе. Также были описаны алгоритмы самодиагностики этих устройств и встроенного загрузчика для более удобной загрузки программного обеспечения в микроконтроллеры исполнительных устройств и сервера управления.

Приведенные в данной главе алгоритмы были проверены с помощью макета. По результатам исследования разработанные алгоритмы были признаны работоспособными, однако необходимы проверки алгоритмов на системе с большим количеством объектов и с использованием устройств, собранных на основе разработанных печатных плат.

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Технико-экономическое обоснование научно-исследовательских работ проводится с целью определения и анализа денежных затрат, направленных на их реализацию, а также уровня их научно-технической результативности, так как на сегодняшний день перспективность научно-исследовательской работы определяется не столько масштабом результата, оценить которое на первых этапах бывает достаточно проблематично, сколько экономической ценностью разработки. Оценка экономической ценности разработки является необходимым условием при поиске инвестиций для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Экономическая привлекательность разработки определяется не только превышением технических характеристик разработки над существующими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

Таким образом, целью данного раздела является оценку экономического потенциала проектной работы. Итогом работы является создание макетов основных узлов динамической системы группового позиционирования объектов “Кинетический дождь” (исполнительного устройства и сервера управления). Поэтому в разделе произведен расчет материальных затрат на изготовление таких макетов.

### **4.1 Организация и планирование работ**

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо оптимально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

В данном пункте представлен полный перечень проведенных работ, определены их исполнители и оптимальная продолжительность. В результате планирования работ был построен линейный график реализации проекта. Для его построения было необходимо составить перечень работ исполнителей (научный руководитель (НР) и инженер (И)) и обозначить загрузку каждого из них (таблица 21).

Таблица 21 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Номер этапа	Этап работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
1.	Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
2.	Составление и утверждение технического задания	НР, И	НР – 100% И – 10%
3.	Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 30% И – 100%
4.	Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 10%
5.	Анализ существующих решений	НР, И	НР – 80% И – 100%
6.	Выработка концепции работы создаваемой системы	НР, И	НР – 100% И – 70%
7.	Описание математической модели движения объектов системы	НР, И	НР – 100% И – 80%
8.	Подбор компонентов и разработка аппаратной и программной части исполнительного устройства	НР, И	НР – 30% И – 100%
9.	Подбор компонентов и разработка аппаратной и программной части сервера управления	НР, И	НР – 30% И – 100%
10.	Создание макетов компонентов системы и отладка основных алгоритмов работы	НР, И	НР – 30% И – 100%

Продолжение таблицы 21 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Номер этапа	Этап работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
11.	Анализ перспективности, оценка целесообразности разработки и затрат	И	И – 100%
12.	Анализ выявленных вредных и опасных факторов производственной среды, защита в чрезвычайных ситуациях, правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	И	И – 100%
13.	Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
14.	Оформление графического материала	И	И – 100%
15.	Подведение итогов	НР, И	НР – 60% И – 100%

#### 4.2 Продолжительность этапов работ

Расчет продолжительности этапов работ может осуществляться двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

Ввиду отсутствия достаточно развитой базы трудоемкости планируемых процессов, было решено использовать опытно-статистический метод, который в свою очередь реализуется двумя способами: аналоговым и экспертным. Для дальнейшей работы было решено использовать экспертный метод, ввиду отсутствия аналога или проекта полностью идентичного данной НИР.



Для определения вероятных (ожидаемых) значений продолжительности работ  $t_{ож}$  применяется следующая формула:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}, \quad (18)$$

где  $t_{min}$  – минимальная продолжительность работы, дн.;

$t_{max}$  – максимальная продолжительность работы, дн.

Для построения линейного графика были рассчитаны длительности этапов в рабочих днях, а затем переведены в календарные дни.

Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях осуществляется по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д}, \quad (19)$$

где  $t_{ож}$  – продолжительность работы, дн.;

$K_{ВН}$  – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей,  $K_{ВН} = 1$ ;

$K_{Д}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ,  $K_{Д} = 1,2$ .

Расчет продолжительности этапа в календарных днях осуществляется по формуле:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К}, \quad (20)$$

где  $T_{КД}$  – продолжительность выполнения этапа в календарных днях.

$T_{К}$  – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле:

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (21)$$

где  $T_{КАЛ}$  – календарные дни;

$T_{ВД}$  – выходные дни;

$T_{ПД}$  – праздничные дни.

С учетом формулы (21):

$$T_K = \frac{366}{366 - 74} = 1,25$$

Далее были определены продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе (таблица 22).

Таблица 22 – Трудозатраты выполнения проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	НР	2	5	3,2	3,84	—	4,8	—
2.	НР, И	4	6	4,8	5,76	0,58	7,2	0,73
3.	НР, И	3	5	3,8	1,37	4,56	1,71	5,7
4.	НР, И	1	3	1,8	2,16	0,22	2,7	0,28
5.	НР, И	3	6	4,2	4,03	5,04	5,04	6,3
6.	НР, И	5	7	5,8	6,96	8,35	8,7	6,96
7.	НР, И	3	5	3,8	4,56	3,65	5,7	4,56
8.	НР, И	8	14	10,4	3,74	12,48	4,68	15,6
9.	НР, И	5	7	5,8	2,09	6,96	2,61	8,7
10.	НР, И	5	7	5,8	2,09	6,96	3,13	10,44
11.	И	3	5	3,8	—	4,56	—	5,7
12.	И	3	5	3,8	—	4,56	—	5,7
13.	И	15	21	17,4	—	20,88	—	26,1
14.	И	3	5	3,8	—	4,56	—	5,7
15.	НР, И	3	5	3,8	2,74	4,56	4,1	5,7
<b>Итого:</b>				<b>90,8</b>	<b>39,34</b>	<b>87,92</b>	<b>50,37</b>	<b>108,17</b>

Затем был построен линейный график реализации проекта, который представлен в приложении Г.

#### 4.3 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости и ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;

- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- прочие (накладные расходы) расходы.

#### 4.3.1 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ. Цена материальных ресурсов, определенная по соответствующим ценникам или договорам поставки, приведена в таблице 23.

Таблица 23 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	500	1 уп.	500
Картридж для принтера	2000	1 шт.	2000
Покупка лицензии Matlab (10%)	98 981	1 шт.	9 898
Лабораторный источник питания	3500	1 шт.	3500
Набор соединительных проводов	58	2 уп.	116
Отладочная плата на базе микро-контроллера STM32F103C8T6	104	2 шт.	208
Программатор ST-Link	120	2 шт.	240
Шаговый двигатель 28BYJ-48 с драйвером ULN2003	230	1 шт.	230
Макетная плата	100	2 шт.	200
Ethernet – адаптер W5500	230	2 шт.	460
Адаптер USB – RS-232	120	1 шт.	120
Датчик Холла SS49E	5,6	2 шт.	11,2
RGB-светодиод WS2812b	38,1	2 шт.	76,2
Набор резисторов	117	1 уп.	117
Паяльная станция	1800	1 шт.	1800
Паяльные принадлежности	500	1 уп.	500
Мультиметр	500	1 шт.	500
<b>Итого:</b>			<b>20 476,4</b>

В связи с тем, что время пользования лицензией составляет 10% от общего срока действия (1 год), то и цены были взяты с тем же расчетом. Для разработки электрических схем, печатных плат и программного обеспечения для микроконтроллеров были использованы условно бесплатные программы.

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны  $C_{\text{мат}} = 20\,476,4 \cdot 1,05 = 21\,500,22$  руб.

#### 4.3.2 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы был выполнен на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{\text{дн-т}}$ ) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = MO/24,3, \quad (22)$$

Расчеты затрат на основную заработную плату приведены в таблице 24. При расчете учитывалось, что в году 292 рабочих дней и, следовательно, в месяце 24,3 рабочих дня. Затраты времени на выполнение работы по каждому исполнителю были взяты из таблицы 22. Также были приняты во внимание коэффициент дополнительной заработной платы  $K_{\text{ДЗП}} = 1,1$ , премиальный коэффициент  $K_{\text{доп.ЗП}} = 1,188/1,113$  для пяти- и шестидневной рабочей недели соответственно и районный коэффициент  $K_{\text{р}} = 1,3$ . Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку необходимо первую умножить на интегральный коэффициент ( $K_{\text{и}} = 1,1 \cdot 1,188 \cdot 1,3 = 1,699$  – для шестидневной рабочей недели;  $K_{\text{и}} = 1,1 \cdot 1,113 \cdot 1,3 = 1,62$  – для пятидневной рабочей недели).

Таблица 24 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб. день	Затраты времени, раб. дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	<b>33 664</b>	1385,35	40	1,699	<b>94 148,39</b>
И	<b>15 470</b>	636,63	88	1,62	<b>90 757,97</b>
<b>Итого:</b>					<b>184 906,36</b>

#### 4.3.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту, то есть  $C_{\text{соц.}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,3$ . В данной работе:  $C_{\text{соц.}} = 184\,906,36 \cdot 0,3 = 55\,471,91$  руб.

#### 4.3.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot Ц_{\text{э}}, \quad (23)$$

где  $P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{\text{э}}$  – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$  – время работы оборудования, час.

Для ТПУ  $Ц_{\text{э}} = 5,748$  руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 22 для инженера ( $T_{\text{рд}}$ ) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов. Вычисления осуществляются по формуле:

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t, \quad (24)$$

где  $K_t = 0,6$  – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к  $T_{\text{рд}}$ .

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{ОБ}} = P_{\text{НОМ.}} \cdot K_{\text{С}}, \quad (25)$$

где  $P_{\text{НОМ.}}$  – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_{\text{С}} \leq 1$  – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности  $K_{\text{С}} = 1$ .

Расчет затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 25.

Таблица 25 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$ , час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$ , кВт	Затраты $\Delta_{\text{ОБ}}$ , руб.
Персональный компьютер	704 · 0,6	0,3	728,39
Лазерный принтер	30	0,1	17,24
Паяльная станция	352 · 0,6	0,048	58,27
Лабораторный источник питания	352 · 0,6	0,04	48,56
<b>Итого:</b>			<b>852,46</b>

#### 4.3.5 Расчет амортизационных расходов

В данном пункте были рассчитаны амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта. Вычисления осуществлялись по формуле:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{H_{\text{А}} \cdot C_{\text{ОБ}} \cdot t_{\text{рф}} \cdot n}{F_{\text{д}}}, \quad (26)$$

где  $H_{\text{А}}$  – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$C_{\text{ОБ}}$  – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году;

$t_{рф}$  – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

$n$  – число задействованных однотипных единиц оборудования.

При использовании нескольких типов оборудования, амортизация рассчитывается для каждого оборудования, затем результаты суммируются. Результаты вычислений приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Расчет расходов на амортизацию

Наименование оборудования	Срок амортизации	Балансовая стоимость, руб.	Действительный годовой фонд времени работы, ч.	Амортизация, руб.
Персональный компьютер	2,5 года	45000	2336	5424,66
Лазерный принтер	2 года	10 000	500	300
Паяльная станция	1,5 года	1800	934,4	452,05
Лабораторный источник питания	1,5 года	3500	934,4	879
Мультиметр	2 года	500	934,4	94,178
<b>Итого:</b>				<b>7149,88</b>

#### 4.3.6 Расчет прочих расходов

В данном пункте отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов:

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат.}} + C_{\text{зп.}} + C_{\text{соц.}} + C_{\text{эл.}} + C_{\text{ам.}}) \cdot 0,1. \quad (27)$$

В данной работе сумма всех предыдущих расходов составляет  $C_{\text{мат.}} + C_{\text{зп.}} + C_{\text{соц.}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам.}} = 21\,500,22 + 184\,906,36 + 55\,471,91 + 852,46 + 7149,88 = 269\,880,83$  руб.

Следовательно, сумма прочих расходов составляет:

$$C_{\text{проч.}} = 269\,880,83 \cdot 0,1 = 26\,988,083 \text{ руб.}$$

#### 4.3.7 Расчет общей себестоимости разработки

На основании всех проведенных выше расчетов по всем статьям сметы затрат на разработку была определена общая себестоимость проекта (таблица 27).

Таблица 27 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат.}}$	21 500,22
Основная заработная плата	$C_{\text{зп.}}$	184 906,36
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц.}}$	55 471,91
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.}}$	852,46
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам.}}$	7149,88
Прочие расходы	$C_{\text{проч.}}$	26 988,083
<b>Итого:</b>		<b>296 868,91</b>

Таким образом, затраты на разработку составили  $C = 296\,868,91$  руб.

#### 4.3.8 Расчет прибыли

Прибыль от реализации проекта в зависимости от конкретной ситуации (масштаб и характер получаемого результата, степень его определенности и коммерциализации, специфика целевого сегмента рынка и т.д.) может определяться различными способами. В данной работе прибыль составляет 59 373,78 руб. (20 %) от расходов на разработку проекта.

#### 4.3.9 Расчет НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли. Для данного проекта НДС составляет  $(296\,868,91 + 59\,373,78) \cdot 0,2 = 71\,248,54$  руб.

#### 4.3.10 Цена разработки НИР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС. Для данного проекта цена разработки составляет:

$$C_{\text{НИР(КР)}} = 296\,868,91 + 59\,373,78 + 71\,248,54 = 427\,491,23 \text{ руб.}$$



#### **4.4 Оценка экономической эффективности проекта**

Актуальным аспектом качества выполненного проекта является экономическая эффективность его реализации, то есть соотношение обусловленного ей экономического результата (эффекта) и затрат на разработку проекта. Так как последние являются единовременными, то мы имеем дело с частным случаем задачи оценки экономической эффективности инвестиций, то есть вложением денежных средств с целью получения определенного результата в будущем.

Данная работа имеет прямой экономический эффект, в виде увеличения прибыли, ввиду увеличения количества посетителей заведения или шоу/представления, руководители которых установят данную систему. Этому способствует развитый интерес людей к всевозможным технологиям, относящимся к классу развлечений, например, поющие фонтаны. Однако количественно рассчитать данный эффект не представляется возможным, ввиду незавершенности проекта и отсутствия стоимостных оценок существующей и разработанной систем.

Существующая система не является доступной для различных организаций, ввиду большого количества элементов и использовании в основном покупных элементов для основных узлов, что существенно увеличивает стоимость системы и усложняет ее монтаж. Разработанная же система, благодаря проектной компоновке (количество исполнительных элементов может быть любым), обеспечивает доступность таких систем, также монтаж данной системы не является сложным процессом, ввиду наличия быстросъемных соединений, что уменьшает время и стоимость монтажа. Кроме того, пользователь сам может заказать компоненты аппаратных частей узлов системы (кроме микроконтроллеров), осуществить самостоятельную сборку этих узлов, и лишь заказать у разработчиков микроконтроллеры с необходимым программным обеспечением.

Исходя из вышесказанного, использование разработанной системы как средства привлечения клиентов позволяет получить желаемый эффект с мень-

шими первоначальными вложениями. Последнее обстоятельство является существенным фактором экономической эффективности разработки.

## **5 Социальная ответственность**

### **5.1 Аннотация**

Согласно [28] социальная ответственность — это ответственность организации за воздействие ее решений и деятельности на общество и окружающую среду через прозрачное и этическое поведение, которое:

- содействует устойчивому развитию, включая здоровье и благосостояние общества;
- учитывает ожидания заинтересованных сторон;
- соответствует применяемому законодательству и согласуется с международными нормами поведения (включая промышленную безопасность и условия труда, экологическую безопасность);
- интегрировано в деятельность всей организации и применяется во всех ее взаимоотношениях (включая промышленную безопасность и условия труда, экологическую безопасность).

В данной работе представлена система управления групповым позиционированием объектов, формирующих инсталляции в двух- трехмерном пространстве. Данная система предназначена для привлечения посетителей заведений, сопровождения представлений или шоу, посредством позиционирования объектов системы специальным образом, образуя динамические инсталляции.

Работы по разработке производились в аудитории 117А учебного корпуса №10 НИ ТПУ. Для проведения работ было выделено рабочее место, включающее в себя рабочий стол с размерами 150x80x87 см и компьютер со всем необходимым программным обеспечением. Кроме того, аудитория оборудована всем необходимым для осуществления работ по пайке компонентов, а также механической обработки материала. Внешний вид аудитории представлен на рисунке 42.



Рисунок 42 – Внешний вид аудитории, в которой выполнялась работа

В данной главе разработан комплекс мероприятий, направленный на минимизацию или устранение негативных последствий, которые могут возникнуть при разработке и эксплуатации системы.

## **5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

В подразделе рассмотрены специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства. Также приведены основные эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны исследователя.

### **5.2.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства**

Законодательство РФ об охране труда основывается на Конституции РФ и состоит из федерального закона, других федеральных законов и иных нормативных правовых актов субъектов РФ. Среди них можно выделить федеральный закон “Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний”.

В аудитории, где проводится работа по разработке системы, предусмотрены места для проведения работ по пайке и механической обработке. Это может повлечь за собой травмы при несоблюдении техники безопасности. Поэтому для выполнения работ в данной аудитории каждый студент проходит инструктаж по технике безопасности, результаты которого заносятся в специальные журналы. Периодичность прохождения инструктажа составляет 0,5 года. Кроме того, аудитория оборудована аптечками для оказания первой медицинской помощи пострадавшему.

При разработке проектных решений в вычислительных центрах не обязателен режим сокращенного рабочего дня, достаточно установление перерывов в работе.

Все виды работ, проводимые в лабораторном комплексе (вычислительном центре), относятся к классу 2 – допустимые условия труда, при которых уровень вредных факторов трудового процесса не превышает показателей, установленных гигиеническими нормативами для рабочих мест, а возможные изменения функционального состояния организма восстанавливаются во время регламентированного отдыха или к началу следующей смены. В связи с этим дополнительных льгот и компенсаций работникам этой области не предусмотрено.

При выполнении данной работы основная нагрузка приходится на центральную нервную систему, так как происходит умственная работа. При проектировании необходимо организовать комфортные условия для полноценной работы.

Согласно «Трудовому кодексу Российской Федерации» от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. от 01.04.2019), рабочее время - время, в течение которого работник в соответствии с правилами внутреннего трудового распорядка и условиями трудового договора должен исполнять трудовые обязанности, а также иные периоды времени, которые в соответствии с настоящим Кодексом, другими федеральными законами и иными нормативными правовыми актами Российской Федерации относятся к рабочему времени.

По нормам [29] на протяжении рабочего дня должны быть регламентированы перерывы для качественной работы. Время перерывов в течение рабочей смены устанавливается с учетом её длительности, вида и категории трудовой деятельности. Во время проведения исследований и других работ при написании данной работы перерывы выполнялись по 5 минут в конце каждого рабочего часа.

В учреждениях, где предполагается использование разрабатываемой системы, нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю. В течение рабочего дня работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более двух часов и не менее 30 минут. Порядок исчисления нормы рабочего времени на определенные календарные периоды (месяц, квартал, год) в зависимости от установленной продолжительности рабочего времени в неделю определяется федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере труда. Работодатель обязан вести учет времени, фактически отработанного каждым работником.

### **5.2.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя**

Рабочее место – это часть пространства, в котором инженер осуществляет трудовую деятельность, и проводит большую часть рабочего времени. Рабочее место, хорошо приспособленное к трудовой деятельности работника, правильно и целесообразно организованное, в отношении пространства, формы, размера обеспечивает ему удобное положение при работе и высокую производительность труда при наименьшем физическом и психическом напряжении.

Согласно стандарту ГОСТ 12.2.032-78 [30], конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов должно соответствовать антропо-

метрическим, физическим и психологическим требованиям. Большое значение имеет также характер работы.

Главными элементами рабочего места являются письменный стол и кресло. Основным рабочим положением является положение сидя. Поэтому для исключения возникновения заболеваний, связанных с малой подвижностью работника, необходимо иметь возможность свободной перемены поз. Также необходимо соблюдать режим труда и отдыха с перерывами, заполняемыми “отвлекающими” мышечными нагрузками на те звенья опорно-двигательного аппарата, которые не включены в поддержание основной рабочей позы.

По нормам [29], при использовании ПВЭМ с ВДТ на базе ЭЛТ (без вспомогательных устройств - принтер, сканер и др.), отвечающих требованиям международных стандартов безопасности компьютеров, с продолжительностью работы менее 4 часов в день допускается минимальная площадь 4,5 м<sup>2</sup> на одно рабочее место пользователя (взрослого и учащегося высшего профессионального образования).

Согласно [31], общая площадь аудитории 117А составляет 25,7 м<sup>2</sup> на 10 рабочих мест. Средняя площадь на одно рабочее место составляет:

$$S_{\text{арм}} = \frac{S_{\text{ауд}}}{N_{\text{арм}}}, \quad (28)$$

где  $S_{\text{арм}}$  – площадь на одно автоматизированное рабочее место, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{ауд}}$  – общая площадь аудитории, м<sup>2</sup>;

$N_{\text{арм}}$  – количество рабочих мест, предусмотренных на аудиторию.

Используя формулу (28), получим:

$$S_{\text{арм}} = 2,57 \text{ м}^2.$$

Следовательно, средняя площадь пространства на одного учащегося в аудитории занижена на 43% от необходимой нормы.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 – 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

### 5.3 Профессиональная социальная безопасность

В пункте проанализированы вредные и опасные факторы, которые могут возникать при проведении исследований в лаборатории, при разработке или эксплуатации проектируемого решения.

Перечень опасных и вредных факторов, влияющих на персонал в заданных условиях деятельности, представлен в таблице 28.

Таблица 28 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	ГОСТ 12.0.003-74[32] СанПиН 2.2.4-548-96 [33] СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03[34] ГОСТ 12.1.003-83[35] СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [29] ГОСТ 12.1.030-81[36]
Отклонение от норм шума		+	+	
Отклонение от норм освещенности	+	+	+	
Отклонение от норм электромагнитных излучений	+	+	+	
Электрический ток	+	+	+	

Данные явления могут негативно повлиять на состояние здоровья, вызывать аварийную или травмоопасную ситуацию. Для предотвращения этих факторов следует установить эффективный контроль выполнения требований и норм, обозначенных к данным параметрам.



### **5.3.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования**

Основные узлы системы, а именно сервер управления и исполнительные устройства располагаются под потолком здания, в котором они расположены.

У данных устройств отсутствуют открытые токоведущие части, ввиду покрытия плат устройства компаундом. Кроме того, для этих устройств в будущем будут предусмотрены корпуса, со степенью защиты не ниже IP51.

Шаговые двигатели, которые могут влиять на отклонение шума, работают в микрошаговом режиме, что заметно снижает шум двигателя, кроме того двигатель крепится внутри корпуса с помощью специальных держателей, которые выступают в роли демпферов, что также снижает вибрации, создаваемые устройством.

Из всего вышесказанного следует, что данные устройства практически не создают вредных и опасных факторов для человека при эксплуатации.

### **5.3.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследования**

#### **5.3.2.1 Микроклимат**

Разработка программно-аппаратной части узлов системы, а именно написание и наладка кода микроконтроллеров и разработка плат, производится за персональным компьютером. Согласно СанПиН 2.2.4.548–96 [37], работа инженера-программиста относится к категории легких работ (А1). Категория А1 относится к работам с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением.

Показателями, характеризующими микроклимат в производственных помещениях, являются:

- 1) температура воздуха;
- 2) температура поверхностей;
- 3) относительная влажность воздуха;

- 4) скорость движения воздуха;
- 5) интенсивность теплового облучения.

Оптимальный микроклимат на рабочем месте обеспечивает комфорт в течение работы при минимальном напряжении механизмов терморегуляции человека, не вызывает отклонений состояния здоровья, обеспечивает условия для высокого уровня работоспособности и является предпочтительным на рабочем месте.

Допустимые значения показателей микроклимата для категории А1 приведены в таблице 29.

Таблица 29 – Допустимые показатели микроклимата

Период года	Наименование параметра			
	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22-24	21-25	40-60	0,1
Теплый	23-25	22-26	40-60	0,1

Разработка системы происходит в помещении, средняя температура на период проведения работ составила 22 °С. Влажность воздуха также поддерживается в требуемом диапазоне значений. Поэтому необходимость в дополнительных мероприятиях по созданию благоприятных условий отсутствует.

### 5.3.2.2 Шум

Ввиду того, что основная работа по разработке системы происходит за компьютером, то увеличению уровня шума способствует активная система охлаждения персональных компьютеров. Шум является важным фактором, влияющим на организм человека и на качество выполняемой им работы. В соответствии с СН 2.2.4/2.1.8.562–96 [38] уровень шума на рабочем месте, оборудованном персональным компьютером, не должен превышать 50 дБ. Уровень шума системы охлаждения используемого персонального компьютера в целом соответствует нормам и составляет 30 дБ.

Уровень шума, создаваемый системой охладителей компьютера, может быть снижен путем очистки или замены системы охлаждения персонального компьютера, например, на жидкостную.

### **5.3.2.3 Освещенность**

Работа, выполняемая с использованием вычислительной техники, относится к III разряду зрительной работы и имеет следующие недостатки:

- обеспечение необходимых уровней освещенности в горизонтальной плоскости в зоне бумажного носителя и клавиатуры;
- исключение засветки изображения на экране монитора путем ограничения освещенности вертикальной плоскости экрана монитора;
- обеспечение надлежащего распределения яркости в центральном поле зрения пользователя;
- снижение прямой и отраженной блескости;
- ограничение глубины пульсации освещенности.

Помещение с персональным компьютером имеет естественное и искусственное освещение. При выполнении работ категории высокой зрительной точности (наименьший размер объекта различения 0,3...0,5мм) величина коэффициента естественного освещения (КЕО) должна быть не ниже 1,5%, а при зрительной работе средней точности (наименьший размер объекта различения 0,5...1 мм) КЕО должен быть не ниже 1%.

В качестве источников искусственного освещения используются люминесцентные лампы белого свечения (ЛБ) или холодного свечения (ЛХБ), металлогалогенные лампы (МГЛ) и ртутные лампы высокого давления (ДРЛ). Они должны располагаться над рабочими поверхностями равномерно. На рабочем месте желательно применение комбинированной системы освещения: люминесцентные лампы типа ЛБ. Люминесцентные лампы имеют ряд существенных преимуществ: излучаемый ими свет близок к дневному, естественному свету; обладают повышенной светоотдачей, имеют более длительный срок службы.

Требования к освещенности в помещениях, где установлены компьютеры, следующие: при выполнении зрительных работ высокой точности общая освещенность должна составлять 300 лк. При недостатке на рабочем месте естественного освещения, можно выполнить следующие мероприятия:

1. в случае наличия в помещении зон с достаточным и недостаточным естественным освещением изменение расположения рабочих мест с их перемещением в зону с достаточным естественным освещением;

2. анализ степени загрязнения стекол в светопроемах, их чистка и последующие контрольные измерения КЕО;

3. установка более мощных ламп в светильник;

4. установка дополнительного количества светильников;

5. установка дополнительного светильника для местного освещения рабочей поверхности;

6. косметический ремонт помещения с использованием светлых отделочных материалов и последующие контрольные измерения КЕО.

Требования к освещению рабочих мест, оборудованных персональными компьютерами, изложены в документах [39] и [34]. Для общего освещения помещений следует использовать лампы со световой отдачей не менее 55 лм/Вт. Для освещения помещений, оборудованных персональными компьютерами, следует применять систему общего освещения. Также допускается применение комбинированного освещения с целью дополнительного освещения бумажного носителя при исключении засветки от экрана монитора.

Рассчитаем освещение помещения. Размеры помещения 6,1x4,5x3,2 м, высота рабочей поверхности  $h_{рп} = 0,87$  м. Требуемая освещенность для данного разряда зрительных работ, согласно [39], составляет 300 лк

Аудитория, где осуществляется выполнение выпускной квалификационной работы, оборудована 4 светильниками TLC424 EM, каждый из которых содержит по 4 люминесцентные лампы ЛЛ T5 G5 (OSRAM FQ 24W/840 HO G5). Исходя из этого, общее число ламп в помещении составит 16.

На основе данных из руководства по эксплуатации для данных ламп, рассчитаем освещенность помещения, выразив её из формулы расчета общего равномерного освещения методом коэффициента светового потока. Учитывая световой поток, отраженный от потолка и стен, световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot Z \cdot K_3}{N \cdot \eta}, \quad (29)$$

где  $E$  – нормируемая минимальная освещенность;

$S$  – площадь освещаемого помещения (27,5 м<sup>2</sup>);

$K_3$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, запыленность ( $K_3 = 1,5$  - для помещений с малым выделением пыли);

$Z$  – коэффициент неравномерности освещения (для люминесцентных ламп берется равным 1,1);

$n$  – число ламп ( $n=16$ );

$\eta$  – коэффициент использования светового потока - показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность.

Степень использования светового потока ламп в помещении зависит как от геометрии помещения (площади ( $S$ ), линейных размеров ( $a$ ,  $b$ ), высоты уровня светильников над рабочей поверхностью ( $h$ )), так и от коэффициентов отражения стен  $p_c$  и потолка  $p_n$ . Учет геометрии помещения осуществляется, с помощью индекса помещения, вычисляемого по формуле:

$$i = \frac{S}{h \cdot (a + b)}. \quad (30)$$

Учитывая, параметры помещения, приведенные выше —  $i=1,44$ .

Коэффициенты отражения  $p_c$  и  $p_n$  имеют следующие значения:  $p_c = 70\%$  (стены свежепобеленные с окнами закрытыми шторами);  $p_n = 70\%$  (потолок свежепобеленный). Согласно таблице коэффициентов использования светового потока, с люминесцентными лампами имеем  $\eta = 50\%$  [41].

Тогда, с учетом формулы (29):

$$E = \frac{\Phi \cdot N \cdot \eta}{S \cdot Z \cdot K_3} = \frac{1750 \cdot 16 \cdot 0,5}{27,5 \cdot 1,5 \cdot 1,1} = 308,5 \text{ лк}$$

Из чего следует, что освещенность в аудитории соответствует требуемым нормам для выполнения зрительных работ III разряда.

#### 5.3.2.4 Электромагнитные излучения

Электромагнитные поля, характеризующиеся напряженностями электрических и магнитных полей, наиболее вредны для организма человека. Основным источником этих проблем, связанных с охраной здоровья людей, использующих в своей работе автоматизированные информационные системы на основе персональных компьютеров, являются дисплеи (мониторы), они представляют собой источники наиболее вредных излучений, неблагоприятно влияющих на здоровье человека.

Предельно допустимые значения излучений от ЭВМ в соответствии с [29] приведены в таблице 30.

Таблица 30 – Допустимые уровни ЭМП, создаваемых ЭВМ

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электростатического поля	В диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	В диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	В диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	В диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

На расстоянии 5-10 см от экрана и корпуса монитора уровни напряженности могут достигать 140 В/м по электрической составляющей, что значительно превышает допустимые значения.

Длительное воздействие электромагнитного поля на организм человека может привести к проблемам дыхательной, нервной и сердечно сосудистой системы, головным болям, утомляемости. Для обеспечения меньшего уровня электромагнитного излучения использован жидкокристаллический монитор. Необходимо чтобы компьютер был заземлен, а также необходимо по возможности сокращать время работы за компьютером.

### 5.3.2.5 Электрический ток

Электрический ток относится к категории опасных факторов. В помещении, где производится разработка устройства, присутствует большое количество аппаратуры, использующей однофазный электрический ток напряжением 220 В и частотой 50 Гц, в том числе персональный компьютер, за которым происходит основная работа.

Электробезопасность рабочего места обеспечивается в соответствии с [40].

Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей зависит от:

- рода и величины напряжения и тока;
- частоты электрического тока;
- пути тока через тело человека;
- продолжительности воздействия на организм человека.

Согласно ПУЭ лабораторию по степени опасности поражения электрическим током можно отнести к классу помещений без повышенной опасности.

Электробезопасность в помещении лаборатории должна обеспечиваться техническими способами и средствами защиты, а также организационными и техническими мероприятиями.

Поражение человека электрическим током может произойти в следующих случаях:

- 1) при прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ПЭВМ;
- 2) при однофазном (однополюсном) прикосновении незащищенного от земли человека к незащищенным токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением;
- 3) при прикосновении к нетокующим частям, находящимся под напряжением, то есть в случае нарушения изоляции;
- 4) при соприкосновении с полом и стенами, оказавшимися под напряжением;

5) при возможном коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания, блоке развертки монитора.

Мероприятия по устранению опасности поражения электрическим током сводятся к правильному размещению оборудования и применению технических средств защиты. К основным техническим средствам защиты от поражения электрическим током относятся:

1. изоляция токопроводящих частей;
2. защитное заземление;
3. зануление;
4. защитное отключение;
5. предупредительная сигнализация и блокировки.

Безопасность при работе с электроустановками обеспечивается применением различных технических и организационных мер.

Рабочие места должны быть оборудованы отдельными щитами с общим рубильником электропитания, который должен находиться в легкодоступном месте, иметь закрытый зануленный металлический корпус и четкую надпись, указывающую величину номинального напряжения.

Так же нужно соблюдать некоторые правила по безопасности с электроприборами:

- 1) все электроприёмники и электропроводка должна быть с исправной изоляцией;
- 2) нельзя подвешивать провода на гвоздях, металлических и деревянных предметах, перекручивать или завязывать их в узел;
- 3) все токоведущие элементы, электроприборы, розетки, должны быть удалены от труб отопления и водопровода, и других металлических коммуникаций;
- 4) протирать осветительную арматуру от пыли можно только сухой тряпкой;



5) при возгорании электроприборов или электрических проводов нельзя их гасить водой. Необходимо сначала их обесточить, а затем приступить к тушению пожара;

6) при включении любого электрооборудования в сеть сначала подключается шнур к прибору, а затем - к сети. Отключение электроприбора нужно производить в обратном порядке;

7) нельзя прикасаться мокрыми или влажными руками к электроприборам, находящимся под напряжением.

## **5.4 Экологическая безопасность**

В данном пункте рассмотрен характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Выявляются предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате разработки и реализации, предлагаемых в работе решений.

### **5.4.1 Анализ влияния объекта на окружающую среду**

Работа с системой, в состав которой входят персональный компьютер, сервер управления и исполнительные устройства, не влечет за собой негативных воздействий на окружающую среду, поэтому создание санитарно-защитной зоны и принятие мер по защите атмосферы, гидросферы, литосферы не являются необходимыми.

### **5.4.2 Анализ “жизненного цикла” объекта исследования**

Основными источниками загрязнения окружающей среды являются отходы, образующиеся после окончания срока службы устройства управления.

Отходы — это остатки продуктов или дополнительный продукт, образующиеся в процессе или по завершении определенной деятельности и не используемые в непосредственной связи с этой деятельностью [42].

Основные элементы разработанной системы по окончании срока эксплуатации относятся к твердым бытовым отходам и должны быть утилизированы надлежащим образом в соответствующих местах утилизации отходов.

К ним относятся:

- персональный компьютер;
- платы исполнительного устройства и сервера управления и их корпуса;
- шаговые двигатели;
- магнитные метки.

#### **5.4.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды от воздействий объекта исследования**

По завершении срока службы персонального компьютера и элементов системы (сервера управления и исполнительных устройств) можно отнести к отходам электронной промышленности. Переработка таких отходов осуществляется разделением на однородные компоненты, химическим выделением пригодных для дальнейшего использования компонентов и направлением их для дальнейшего использования. Пластмассовые части узлов системы утилизируются при высокотемпературном нагреве без доступа воздуха. Части компьютера, печатные платы, содержащие тяжелые металлы и замедлители горения могут при горении выделять опасные диоксиды. Поэтому для опасных отходов существуют специальные печи, позволяющие использовать теплоту сжигания. Но подобный способ утилизации является дорогостоящим, поэтому не стоит исключать вероятность образования токсичных выбросов.

Отходы, не подлежащие переработке и вторичному использованию, подлежат захоронению на полигонах. Предельно допустимые концентрации токсичных веществ (ПДКп, мг/кг) должны быть соблюдены в соответствии с ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» от 04.05.99 М 96-ФЗ [43].

## **5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

В подразделе приведен краткий анализ возможных чрезвычайных ситуаций (ЧС), которые могут возникнуть при разработке, производстве или эксплуатации проектируемого решения. Чрезвычайные ситуации могут быть техногенного, природного, биологического, социального или экологического характера.

### **5.5.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследования**

Объект исследования может инициировать возникновение такой чрезвычайной ситуации как пожар.

Причинами возникновения пожара могут быть:

- неисправности электропроводки, розеток и выключателей, которые могут привести к короткому замыканию или пробоем изоляции;
- выгорание электронных компонентов, ввиду превышения номинальных параметров питания устройства, что может привести к воспламенению устройства;
- перегрев отдельных элементов устройства.

Для исключения возникновения пожара по причине неисправности электропроводки, розеток или выключателей необходимо вовремя выявлять и устранять неисправности, проводить плановый осмотр и своевременно устранять все неисправности и неисправные электроприборы и не использование неисправные электроприборы. Также необходимо, чтобы электропроводка была скрытой для исключения возможности возникновения короткого замыкания.

С целью уменьшения вероятности воспламенения устройства по причине вышедших из строя компонентов, все внутренние части, за исключением движущихся, покрываются компаундом, который не пропускает кислород к электронным компонентам, что исключает возможность воспламенения.

Кроме того, перегрев отдельных элементов может привести к воспламенению устройства, для исключения такой ситуации в будущем в конструкцию устройства будут добавлены радиаторы для рассеивания тепла.

#### **5.5.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при исследовании объекта**

Вероятной чрезвычайной ситуацией, которая может возникнуть при работе в лаборатории, является пожар.

Причинами возникновения пожара могут быть:

- неисправности электропроводки, розеток и выключателей, которые могут привести к короткому замыканию или пробоем изоляции;
- использование поврежденных (неисправных) электроприборов;
- использование в помещении электронагревательных приборов с открытыми нагревательными элементами;
- возникновение пожара вследствие попадания молнии в здание;
- возгорание здания вследствие внешних воздействий;
- неаккуратное обращение с огнем и несоблюдение мер пожарной безопасности.

В целях предотвращения пожара предлагается проводить с инженерами, работающими в лаборатории, противопожарный инструктаж.

В лаборатории источниками воспламенения могут быть неисправное электрооборудование, неисправности в электропроводке, электрических розетках и выключателях.

Для исключения возникновения пожара по этим причинам необходимо вовремя выявлять и устранять неисправности, проводить плановый осмотр и своевременно устранять все неисправности и неисправные электроприборы и не использовать неисправные электроприборы.

Обогревание помещения открытыми электронагревательными приборами могут привести к пожару, так как в помещении находятся бумажные доку-

менты и справочная литература. Следовательно, использование открытого нагревательного прибора неприемлемо.

В целях уменьшения вероятности возникновения пожара вследствие короткого замыкания необходимо, чтобы электропроводка была скрытой.

В летний период во время грозы возможно попадание молнии вследствие чего возможен пожар. Во избежание этого рекомендуется установить на крыше здания молниеотвод.

Несоблюдение мер пожарной безопасности и курение в помещении также может привести к пожару. Поэтому курение в помещении лаборатории необходимо категорически запретить.

### **5.5.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС**

Пожарная профилактика представляет собой комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращении пожара, ограничение его распространения, а также создание условий для успешного тушения пожара [44].

В случае возникновения пожара в лаборатории необходимо отключить электропитание, вызвать по телефону пожарную команду, эвакуировать людей из помещения согласно плану эвакуации и приступить к ликвидации пожара огнетушителями. План эвакуации из помещения представлен на рисунке 43.

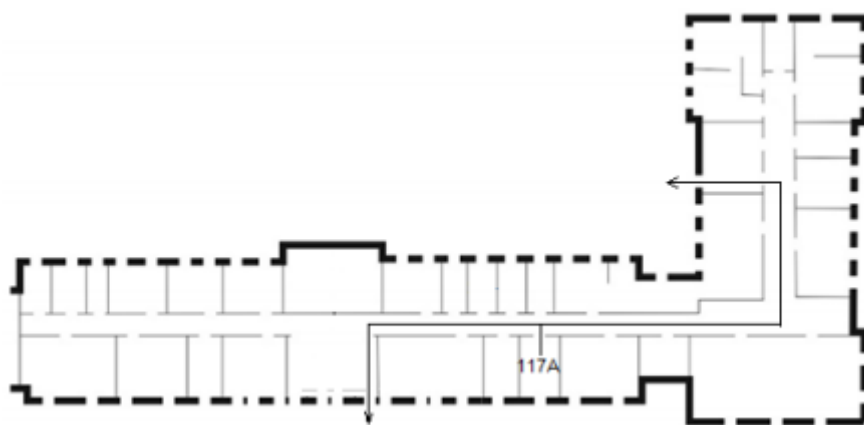


Рисунок 43 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещения учебного корпуса №10, пр. Ленина 2, 1 этаж.

При наличии небольшого очага пламени можно воспользоваться подручными средствами с целью прекращения доступа воздуха к объекту возгорания. Первичными средствами пожаротушения являются специальные материалы, устройства и инструменты, использующие при локализации и (или) при ликвидации возгораний начальной стадии. К ним относятся асбестовое полотно, песок, внутренний пожарный кран, лопата, кошма, ведро, вода, ручные и переносные огнетушители и прочее.

В местах массового скопления людей (торговые центры, залы и т.д.), где предусмотрено использование такой системы, в случае возникновения пожара необходимо следовать приведенному выше порядку действий для лабораторий. Данный порядок действий может дополняться, исходя из правил пожарной безопасности учреждений, где используется разработанная система.

## **Заключение**

В данной выпускной квалификационной работе была спроектирована система управления групповым позиционированием объектов, формирующих инсталляции в двух- трехмерном пространстве. В процессе проектирования был произведен обоснованный подбор элементов основных узлов устройства, а также интерфейсы передачи данных между этими узлами.

Также было получено аналитическое описание движения объектов системы и проведено моделирование процесса формирования инсталляции, в ходе которого была получена двумерная инсталляция визуально схожая с заданным уравнением движения.

Кроме того, была произведена макетная сборка системы, в состав которой входят сервер управления и одно исполнительное устройство. На базе собранного макета системы была проведена проверка приведенных в данной работе алгоритмов, формирующих логику работы основных узлов системы. По результатам исследования разработанные алгоритмы были признаны работоспособными, однако необходимо тиражирование алгоритмов для системы с большим количеством объектов и с использованием устройств, собранных на основе разработанных печатных плат.

### Список использованных источников

1. Kinetic Rain [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.feld.studio/work/kinetic-rain/> (дата обращения: 01.03.2020).
2. Changi Airport, Singapore: EtherCAT synchronizes the movement of 1,216 servo axes // BECKHOFF PC Control [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.pc-control.net/pdf/012013/solutions/pcc\\_0113\\_cover\\_e.pdf](https://www.pc-control.net/pdf/012013/solutions/pcc_0113_cover_e.pdf) (дата обращения: 01.03.2020).
3. Jan Axelson. Serial Port Complete: COM Ports, USB Virtual COM Ports, and Ports for Embedded Systems Second Edition – Madison, 2007. –379p.
4. CAN интерфейс // Рынок микроэлектроники. Справочник по электронным компонентам [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/interface/can/start.htm> (дата обращения: 05.03.2020).
5. Интерфейсная шина ИС (I2C) // Easy Electronics. Электроника для всех [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://easyelectronics.ru/interface-bus-iic-i2c.html> (дата обращения: 05.03.2020).
6. Промышленные сети и интерфейсы // Энциклопедия АСУ ТП [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.bookasutp.ru/Chapter2\\_1.aspx](https://www.bookasutp.ru/Chapter2_1.aspx) (дата обращения: 05.03.2020).
7. MATLAB // Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MATLAB> (дата обращения: 10.03.2020).
8. Maple // Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Maple> (дата обращения: 10.03.2020).
9. GNU Octave // Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/GNU\\_Octave](https://ru.wikipedia.org/wiki/GNU_Octave) (дата обращения: 10.03.2020).
10. Desmos // Free Math [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.desmos.com/> (дата обращения: 12.03.2020).



11. Юдин А.И. Разработка концепции системы «Кинетический дождь» / А.И. Юдин, А.С. Фадеев; науч. рук. А.С. Фадеев // Образовательный форум: перспективы развития науки: сборник материалов Международной научно-практической конференции, 30 апреля 2020 г., г. Кемерово. — Кемерово: Изд-во Science Pro, 2020. — [С. 31-36].

12. Выбор двигателя и привода. Подбор типа электродвигателя // Электропривод. Разработка и производство шаговых, вентильных, коллекторных электроприводов. Продажа электродвигателей, мотор-редукторов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://electroprivod.ru/motor-type-help.htm> (дата обращения: 15.03.2020).

13. Шаговые двигатели и моторы Ардуино 28BYJ-48 с драйвером ULN2003 // Arduino сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arduinomaster.ru/motor-dvigatel-privod/shagovye-dvigateli-i-motory-arduino/> (дата обращения: 15.03.2020).

14. Шаговые двигатели (подробный разбор 4 типов) // IArduino [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://wiki.iarduino.ru/page/shagovye-dvigateli/> (дата обращения: 15.03.2020).

15. Arduino и радиодетали // Интернет-магазин Arduino [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ampermarket.kz/motors/> (дата обращения: 15.03.2020).

16. Датчики Холла. Виды и применения. Работа и подключения // Электросам [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/ustrojstva/datchiki-kholla/> (дата обращения: 30.03.2020).

17. Все о магнитном виниле // Изготовление этикеток [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://markerovka.ru/state/vse-o-magnitnom-vinile.html> (дата обращения: 30.03.2020).

18. SS39ET/SS49E/SS59ET [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://static6.arrow.com/aropdfconversion/4de0234f91b0244c6c8dd5a8095fb68a944>

ffa0/84honeywell-sensing-ss39et-ss49e-ss59et-product-sheet-005850-3-en.p.pdf (дата обращения: 30.03.2020).

19. W5500 // MTsystem [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://mt-system.ru/sites/default/files/documents/w5500\\_ds\\_v104e\\_140613.pdf](http://mt-system.ru/sites/default/files/documents/w5500_ds_v104e_140613.pdf) (дата обращения: 25.03.2020).

20. ENC28J60 // ELECROW [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.elecrow.com/download/ENC28J60%20Datasheet.pdf> (дата обращения: 25.03.2020).

21. ЧИП и ДИП // Интернет-магазин приборов и электронных компонентов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.chipdip.ru/> (дата обращения: 25.03.2020).

22. Оборудование. Технологии. Разработки // Блог технической поддержки моих разработок [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://mypractic.ru/> (дата обращения: 10.04.2020).

23. Modbus // Энциклопедия АСУ ТП [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.bookasutp.ru/Chapter2\\_8.aspx](https://www.bookasutp.ru/Chapter2_8.aspx) (дата обращения: 02.04.2020).

24. FreeRTOS: практическое применение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://microsin.net/programming/arm/freertos-part1.html> (дата обращения: 10.04.2020).

25. Протокол WS2812B на STM32 без пустых циклов и прерываний // Лучшие публикации за сутки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/257131/> (дата обращения: 02.04.2020).

26. RM0008 Reference manual [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.st.com/resource/en/reference\\_manual/cd00171190-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/reference_manual/cd00171190-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf) (дата обращения: 05.04.2020).

27. RM0033 Reference manual [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.st.com/resource/en/reference\\_manual/cd00225773-stm32f205xx-stm32f207xx-stm32f215xx-and-stm32f217xx-advanced-arm-based-32-bit-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/reference_manual/cd00225773-stm32f205xx-stm32f207xx-stm32f215xx-and-stm32f217xx-advanced-arm-based-32-bit-mcus-stmicroelectronics.pdf) (дата обращения: 10.04.2020).

28. IC CSR-08260008000: 2011 «Социальная ответственность организации. Требования».

29. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

30. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

31. Аудитория «117А» // Интерактивная карта ТПУ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://maps.tpu.ru/classroom/view.html?roomId=706> (дата обращения: 05.05.2020).

32. ГОСТ 12.0.003-74. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы.

33. СанПиН 2.2.4-548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

34. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий".

35. ГОСТ 12.1.003-83. "Система стандартов безопасности труда. Шум".

36. ГОСТ 12.1.030-81. "Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность".

37. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

38. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы.

39. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.

40. ГОСТ Р 12.1.019- 2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

41. Безопасность жизнедеятельности: практикум / Ю.В. Бородин, М.В. Василевский, А.Г. Дашковский, О.Б. Назаренко, Ю.Ф. Свиридов, Н.А. Чулков,

Ю.М. Федорчук. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. — 101 с

42. Классификация и утилизация твердых бытовых отходов // Металлургический портал [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/tbo/923-tverdye-bytovye-otkhody.html> (дата обращения: 05.05.2020).

43. ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» от 04.05.99 М 96-ФЗ.

44. ГОСТ 12.1.033-81. ССБТ. Пожарная безопасность. Термины и определения.

## Приложение А

(обязательное)

Листинг скрипта, который демонстрирует работу системы с одним объектом

```
clear;

% Шаг движения по точкам
Step = 1;
% Время обновления координат (мс)
RefreshPic = 40;

% Область определения функции движения
x=0:0.01:100;
% Функция движения
y = (round((0.939*(sin(0.43*x)+1).*(sin(x)+1)./((1+exp(-x+13.5)).*(1+exp(x-135))))*1000))/1000;

% Объекты для формирования графики
F = figure;

%Объект движения
plot (x,y);
xlim([0 max(x)]);
ylim([0 max(y)]);
hold on;
ph1 = plot(x(1), y(1), 'ro', 'MarkerSize', 5, 'MarkerFaceColor', [1 0 0]);
% Переменная для хранения X координаты текущей точки
CurrentPos_X = 1;
% Переменная для хранения Y координаты текущей точки
CurrentPos_Y = y(CurrentPos_X);
%Переменная для хранения X координаты заданной точки
TargetPos_X = CurrentPos_X + Step;
% Переменная для хранения Y координаты заданной точки
TargetPos_Y = y(TargetPos_X);

%hold on;

while isValid(F)
    if TargetPos_X < length(x)
        % Переменная для хранения времени перемещения объекта в заданную точку (по умолчанию
        100 мс)
        RefreshTime = 100;
        % Переменная для хранения скорости движения
        Speed = 1000*(TargetPos_Y - CurrentPos_Y)/RefreshTime; % м/с
        if Speed ~=0
            delta = abs(TargetPos_Y - CurrentPos_Y);
            if delta > 0.001
                CurrentPos_Y = CurrentPos_Y + Speed*RefreshPic/1000;
                set(ph1,'XData',x(1),'YData',CurrentPos_Y);
                pause(RefreshPic/1000);
            else
                CurrentPos_X = TargetPos_X;
                CurrentPos_Y = y(CurrentPos_X);
                TargetPos_X = CurrentPos_X + Step;
                TargetPos_Y = y(TargetPos_X);
            end
        end
    end
end
```

```
        end
    else
        CurrentPos_X = TargetPos_X;
        CurrentPos_Y = y(CurrentPos_X);
        TargetPos_X = CurrentPos_X + Step;
        TargetPos_Y = y(TargetPos_X);
    end
end
end
end
```

## Приложение Б

(обязательное)

Листинг скрипта, который демонстрирует работу системы с множеством объектов

```
clear;

% Шаг движения по точкам
Step = 1;
% Количество объектов
NumOfObjects = 20;
% Время обновления координат (мс)
RefreshAllPic = 50;

% Вектор для хранения X координаты текущей точек
CurrentPos_X = zeros(1, NumOfObjects);
% Вектор для хранения Y координаты текущей точек
CurrentPos_Y = zeros(1, NumOfObjects);
% Вектор для хранения X координаты заданной точек
TargetPos_X = zeros(1, NumOfObjects);
% Вектор для хранения Y координаты заданной точек
TargetPos_Y = zeros(1, NumOfObjects);
% Вектор для хранения времени перемещения точек
RefreshTime = zeros(1, NumOfObjects);
% Вектор для хранения скорости перемещения точек
Speed = zeros(1, NumOfObjects);
% Вектор для хранения модуля отклонения текущих координат точек от заданных
delta = zeros(1, NumOfObjects);

% Область определения функции движения
x=0:0.01:100;
% Функция движения
y = 0.939*(sin(0.43*x)+1).*(sin(x)+1)./((1+exp(-x+13.5)).*(1+exp(x-135)));

% Объекты для формирования графики
F = figure;
% Объект движения
xlim([0 NumOfObjects*Step]);
ylim([0 max(y)]);
hold on;
for i=1:NumOfObjects
    ph1(i) = plot(1+(i-1)*Step, y(1+(i-1)*Step), 'ro', 'MarkerSize', 5, 'MarkerFaceColor', [1 0 0]);
    CurrentPos_X(i) = 1+(i-1)*Step;
    CurrentPos_Y(i) = y(CurrentPos_X(i));
    TargetPos_X(i) = CurrentPos_X(i) + i*Step;
    TargetPos_Y(i) = y(TargetPos_X(i));
end

while isValid(F)
    for i=1:NumOfObjects
        if TargetPos_X(i) < length(x)
            % Время перемещения объекта в заданную точку (по умолчанию 100 мс)
            RefreshTime(i) = 100;
```

```

Speed(i) = 1000*(TargetPos_Y(i) - CurrentPos_Y(i))/RefreshTime(i); % m/c
if Speed(i) ~=0
    delta(i) = abs(TargetPos_Y(i) - CurrentPos_Y(i));
    if delta(i) > 0.001
        CurrentPos_Y(i) = CurrentPos_Y(i) + Speed(i)*RefreshAllPic/1000;
        set(ph1(i),'XData',1+(i-1)*Step,'YData',CurrentPos_Y(i));
    else
        CurrentPos_X(i) = TargetPos_X(i);
        CurrentPos_Y(i) = y(CurrentPos_X(i));
        TargetPos_X(i) = CurrentPos_X(i) + i*Step;
        if TargetPos_X(i) < length(x)
            TargetPos_Y(i) = y(TargetPos_X(i));
        end
    end
else
    delta(i) = 0;
    CurrentPos_X(i) = TargetPos_X(i);
    CurrentPos_Y(i) = y(CurrentPos_X(i));
    TargetPos_X(i) = CurrentPos_X(i) + i*Step;
    if TargetPos_X(i) < length(x)
        TargetPos_Y(i) = y(TargetPos_X(i));
    end
end
end
end
if max(delta)>0.001
    pause(RefreshAllPic/1000);
end
end
end

```



## Приложение В

(обязательное)

Листинг скрипта, формирующего полный набор данных для системы

```
clear;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Входные данные
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Шаг движения по точкам
Step = 1;
% Количество объектов
NumOfObjects = 10;
% Время перемещения объекта в заданную точку (мс)
RefreshTime = 100;
% Высота конструкции над уровнем пола (м)
L = 7;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Локальные переменные
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Вектор для хранения X координаты текущей точек
CurrentPos_X = zeros(1, NumOfObjects);
% Вектор для хранения Y координаты текущей точек
CurrentPos_Y = zeros(1, NumOfObjects);
% Вектор для хранения X координаты заданной точек
Target_X = zeros(1, NumOfObjects);

% Переменная - счетчик
count = 1;
% Вектор - маркер достижения конца функции движения
EndOfFunc = zeros(1, NumOfObjects);
% Область определения функции движения
x=0:0.01:100;
% Функция движения
y = L - 0.939*(sin(0.43*x)+1).*(sin(x)+1)/((1+exp(-x+13.5)).*(1+exp(x-135)));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Выходные переменные
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Массив для хранения Y координаты заданной точек
TargetPos = zeros(NumOfObjects, length(x));
% Массив для хранения скорости перемещения точек
Speed = zeros(NumOfObjects, length(x));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Основная функция
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Формирование начальных позиций объектов
for i=1:NumOfObjects
    CurrentPos_X(i) = 1+(i-1)*Step;
    CurrentPos_Y(i) = y(CurrentPos_X(i));
```

```

    Target_X(i) = CurrentPos_X(i) + i*Step;
    TargetPos(i,count) = y(Target_X(i));
end

while count < length(x)
    for i=1:NumOfObjects
        if EndOfFunc(i) == 0
            Speed(i,count) = 1000*(TargetPos(i,count) - CurrentPos_Y(i))/RefreshTime; % м/с
            % Проверка превышения скорости максимально возможной (2 м/с)
            if abs(Speed(i,count)) > 2
                RefreshTime = round(abs(TargetPos(i,count) - CurrentPos_Y(i))*500); % мс
                str = sprintf('Установите параметр RefreshTime >= %d', RefreshTime);
                disp(str);
                return;
            end
            CurrentPos_X(i) = Target_X(i);
            if Target_X(i) < length(x)
                CurrentPos_Y(i) = y(CurrentPos_X(i));
                Target_X(i) = CurrentPos_X(i) + i*Step;
                if count+1 < length(x) && Target_X(i) < length(x)
                    TargetPos(i,count+1) = y(Target_X(i));
                else
                    EndOfFunc(i) = 1;
                end
            else
                EndOfFunc(i) = 1;
            end
        end
        count = count + 1;
    end
end
end

```

## Приложение Г

(обязательное)

### График реализации проекта

Этап	НР	И	Март			Апрель			Май			Июнь	
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
1.	4,8	—	■										
2.	7,2	0,73	■	■									
3.	1,71	5,7		■	■								
4.	2,7	0,28			■								
5.	5,04	6,3			■	■							
6.	8,7	6,96				■	■						
7.	5,7	4,56					■	■					
8.	4,68	15,6						■	■	■			
9.	2,61	8,7							■	■			
10.	3,13	10,44								■	■		
11.	—	5,7									■		
12.	—	5,7										■	
13.	—	26,1										■	■
14.	—	5,7											■
15.	4,1	5,7											■

НР – ■;

И – ■

**Приложение Д**  
(обязательное)  
System concept development

**Раздел 1**  
**Разработка концепции системы**  
**Part 1**  
**System concept development**

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM81	Юдин Андрей Игоревич		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ ИШИТР	Фадеев Александр Сергеевич	К. Т. Н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Сидоренко Татьяна Валерьевна	К. П. Н.		

## 1 System concept development

This system is a system for precise objects positioning using controlling an array of motors in order to create a moving installation. The basis for the development of the system was taken the structural diagram of the existing system, shown in Figure 1.

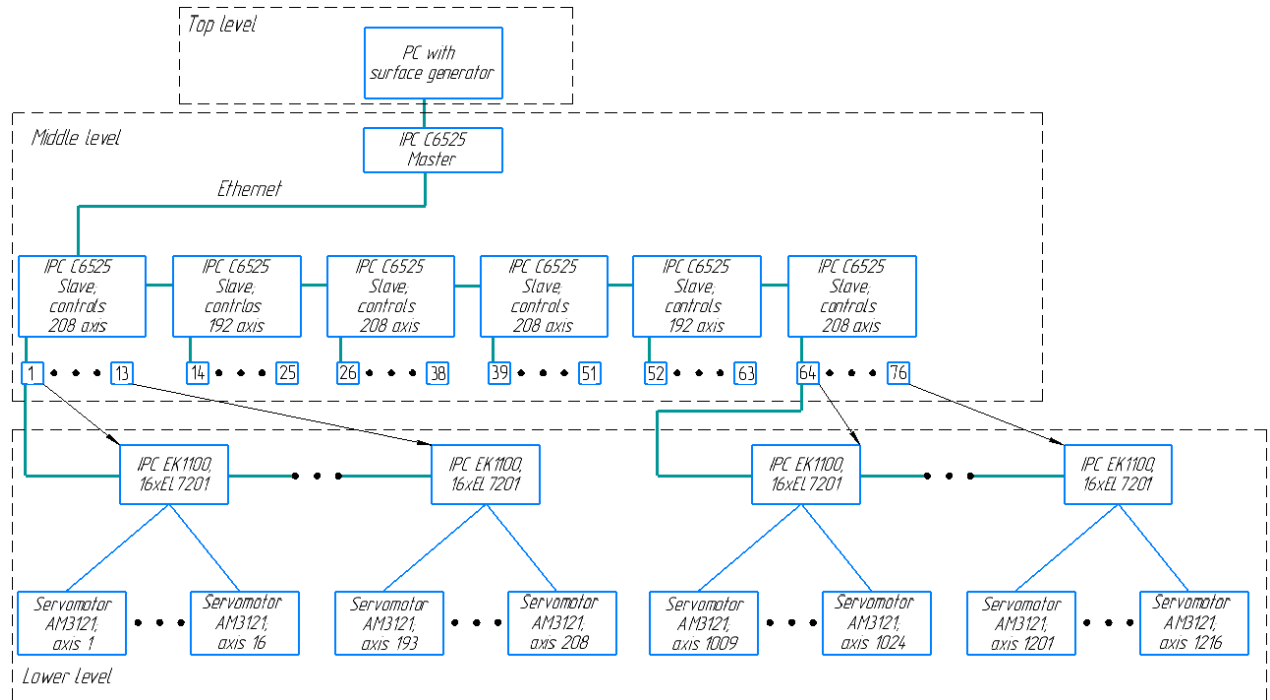
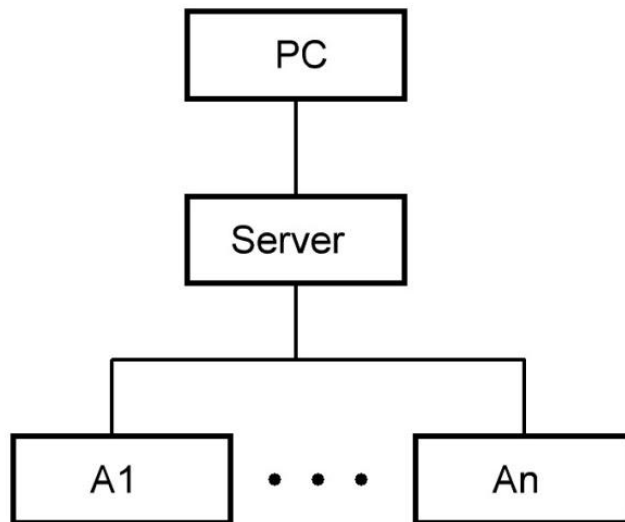


Figure 1 – “Kinetic Rain” system scheme

The system consists of three levels:

- the top level, consisting of a PC on which special software is installed to control the entire system;
- the middle level includes an industrial PC, in the role of a control server, as well as subordinate industrial PCs that control the motor controllers;
- the lower level represents servomotors that directly move the “raindrops” [1].

On the basis of the circuit shown in Figure 1, a structure diagram of the control system for group positioning of objects, shown in Figure 2, was developed. The main criterion for circuit developing was reducing the amount of intermediate equipment used.



A — actuator; PC — computer

Figure 2 – System structure diagram for controlling objects group positioning

The system also consists of three levels, like the existing one. However, at the middle level there is only a control server, and at the lower level, each actuator includes a controller and a motor for moving the object.

The PC transmits to the control server all the necessary data to display the installation, then the control server transmits to each actuator all information, which is necessary for operation.

The following requirements were made to the system:

- design composability, that is the number of “raindrops” should be changeable;
- 3D surface playback at a speed close to reproducing video files (from 10 to 25 frames/s (10 - 25 Hz));
- “droplet” color change using RGB LED;
- ensuring the object moving, at a speed of no more than 2 m/s;
- ease of installation and replacement of a failed device;
- compactness of system components;
- low system cost.

## 1.1 Interfaces for data transfer between system nodes

### 1.1.1 Data exchange between the actuators and the control server

To transfer data between actuators and the control server, it necessary to use an interface that allows connecting a large number of devices and supports network extensibility. In Table 1 the possible digital wired data transmission interfaces are considered [2, 3, 4].

Wireless networks (for example, Bluetooth, Wi-Fi and ZigBee) cannot be used in this case, since in crowded places, for example, in shopping centers, the presence of a large number of wireless devices will lead to system failures because of low noise immunity compared to a wired network [5].

Table 1 – Data transfer interfaces

	Ethernet	RS-232	RS-422	RS-485	CAN	I2C	SPI
Transmission range, m	1000	30	1200	1200	1000	10	3
Connected nodes number	1024	2	10	32	64	127	8
Maximum data rate	1 Gbps	460 Kbps	10 Mbps	10 Mbps	500 Kbps	3,1 Mbps	2,1 Mbps

In the SPI interface, the master selects the slave by moving the signal on the “chip-select” line to the desired slave to a low level. Therefore, the connected devices number to the master using the SPI interface is determined by the presence of the master device inputs/outputs required number for all “chip-select” lines.

Based on the data presented in Table 1, it was decided to use the Ethernet interface as a data transfer interface. The main criterion for selection was the fact that this interface allows connecting 1024 devices to one data line and at the same time supports network extensibility with the additional equipment use, which will make it possible to increase the “raindrops” number and ensure finished system installation ease.

### 1.1.2 Communication between PC and control server

To transfer data from the PC to the server, it was decided to use a wired connection, as well as for communication between the actuator and the server.

Based on the data presented in Table 1, it was decided to select the RS-232 interface as the transmission interface. This interface allows organizing a point-to-point network connection and transfer data at a speed of 460 Kbps. There are also RS-232 - USB adapters, which allow you to increase the data transfer rate up to 1 Mbps, which allows you to reduce the transmission time of information between devices.

### 1.2 System structure diagram

Taking into account the data transfer interfaces chosen above, the final system structure diagram was formed, presenting in Figure 3.

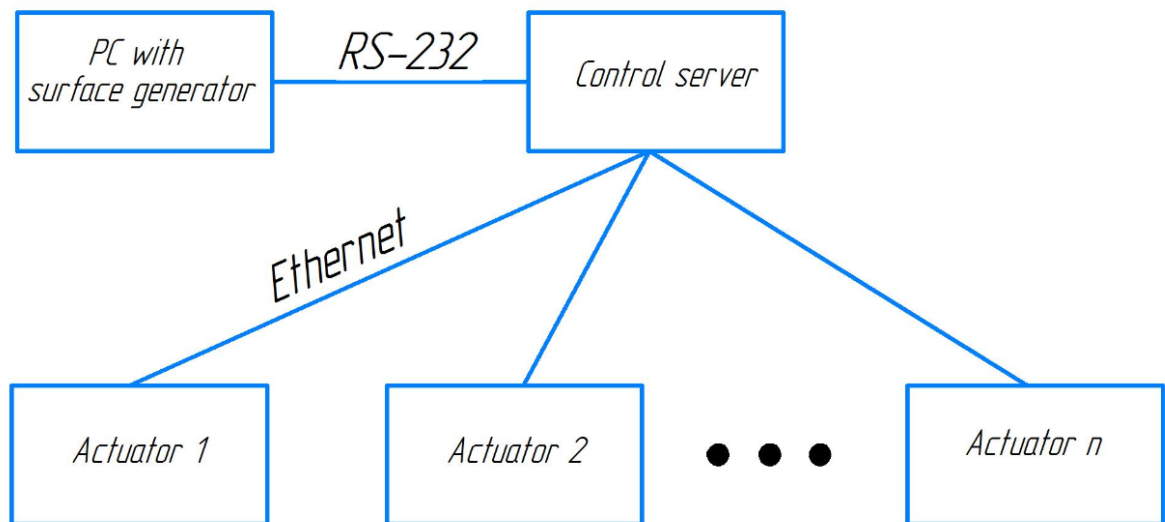


Figure 3 – Final system structure diagram

The control server and actuators are combined in accordance with the radial topology. Each actuator is connected to the server with its own communication line. This allows the system to function when several actuators fail. A system malfunction occurs only when the control server and/or PC with the surface generator fails. The network topology formed with a PC with a surface generator and a control server is a point-to-point topology.



Next, it was necessary to mathematically describe the forming the installation process using moving objects to a given coordinate at a certain speed.

### 1.3 The "droplets" movement analytical model

To realize the possibility of designing software system components of the system, it was necessary to develop an analytical model of the system: to describe the installation formation process with moving objects to a given coordinate at a certain speed.

Consider the forming process a two-dimensional installation. Suppose that there is a motion function  $h(t)$  and the objects number in the system is 5, that are located in the same row (Figure 4). All objects at time  $t_0$  are located in the zero position.

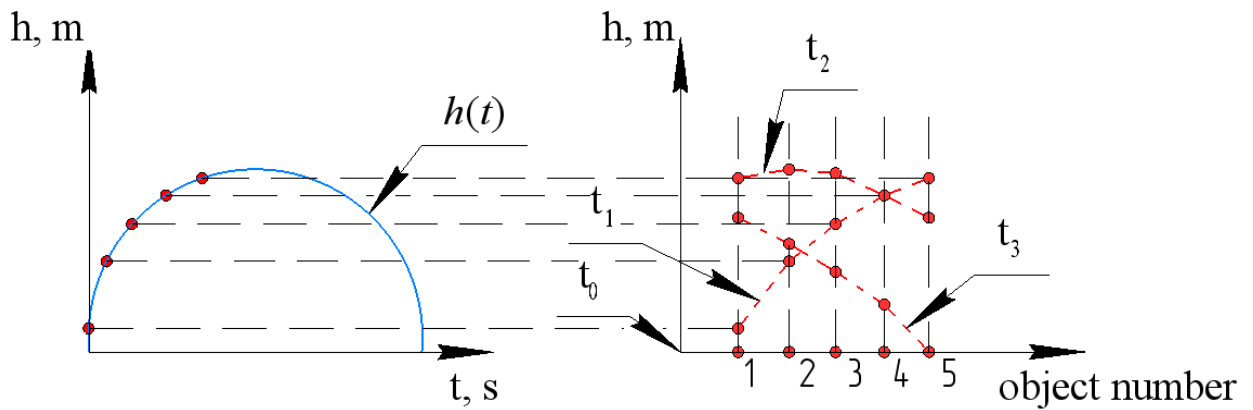


Figure 4 – The process of creating a two-dimensional installation

Further, at times  $t_0 - t_3$ , system objects are built in a certain way, depicting certain sections of a given function, as shown for time  $t_1$  (horizontal dashed lines). In this case, system objects move strictly vertically. In this two-dimensional space, objects are described with the object position number in the row and the object position height relative to the origin.

Combining the trajectory sections obtained at times  $t_0 - t_3$ , we obtain the trajectory shown in Figure 5.

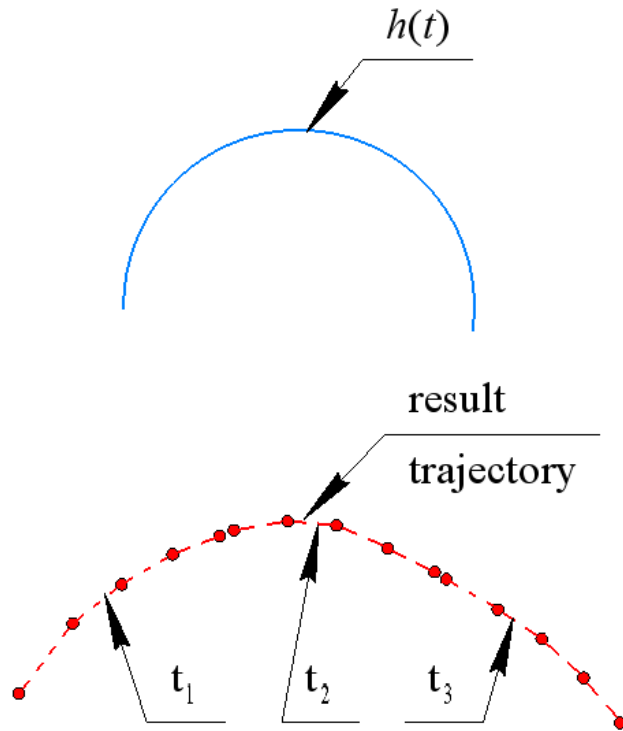


Figure 5 – The creating a two-dimensional installation process result

In Figure 5, the resulting trajectory repeats a fragment of a given function. The main difference is figures width, which depends on the distance between the system objects.

When forming a three-dimensional installation, the rows number with system objects increases. Moreover, each row displays its part of the given surface, transferred to it in the two-dimensional trajectory form. The main requirement for displaying a two-dimensional installation is to synchronize the movement of all objects in the system, that is, the time during which each object in the system reaches the specified coordinate must be the same for all objects. Thus, to create an installation in two-three-dimensional space, it is necessary to transmit the movement coordinate and speed through certain time intervals for each system object.

We obtain an analytical expression for moving the system object along a given trajectory. Suppose that there is a system objects movement trajectory, shown in Figure 6, and it is necessary to move one system object from position 1 to position 2 in the time  $\Delta t = t - t_0$ .

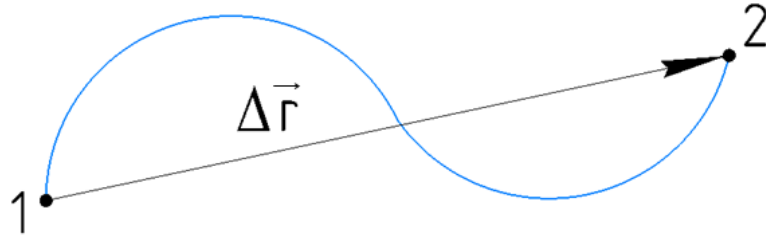


Figure 6 – The objects movement trajectory

The movement along such a trajectory is uneven, since the movement speed will be different on different parts of the trajectory. Since the system object, presented in the “droplet” form, has only one freedom degree and can only move vertically, to smoothly move the object along a given path, it was decided to divide the path into small gaps and move the object within them at a constant speed.

We divide the trajectory into  $n$  not necessarily equal linear gaps (Figure 7).

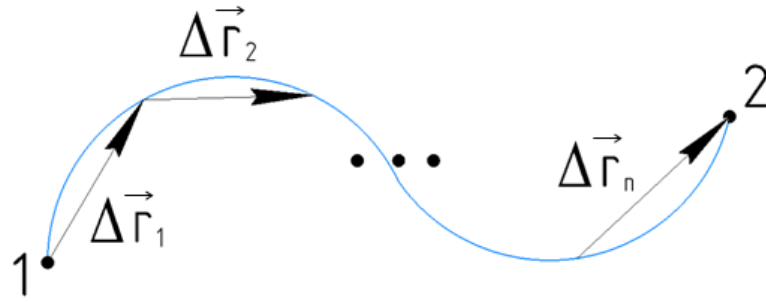


Figure 7 – Partitioning the trajectory into linear gaps

The object speed in each section is determined with the expression:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}, \quad (1)$$

where  $\Delta \vec{r}$  – is the object movement, m;

$\Delta t$  – is the object moving time, s.

Within one interval, the object speed can change, that is, the object can accelerate or decelerate. The object acceleration is determined with the following expression:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}, \quad (2)$$

where  $\Delta \vec{r}$  – is the object movement, m;

$\Delta \vec{v}$  – object moving speed, m/s;

$\Delta t$  – is the object moving time, s.

From the expression (2) it follows that the speed at any time is determined with the expression:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}(t_0) + \int_{t_0}^t \vec{a}(t) dt. \quad (3)$$

Taking into account the formulas (1), (2) and (3) the object movement is determined with the formula:

$$\vec{r}(t) = \vec{r}(t_0) + \int_{t_0}^t (\vec{v}(t_0) + \vec{a}(t)) dt. \quad (4)$$

Since the object movement in each section occurs at a constant speed, the movement of each object can be described with the following expression:

$$h = h_0 + v \cdot t, \quad (5)$$

where  $h$  – set "droplet" position, m;

$h_0$  – starting "droplet" position, m;

$v$  – "droplet speed", m/s;

$t$  – movement object time to a given point, s.

The time  $t_0$  value at each interval is taken equal to 0. The time  $t$  for moving each system object from the coordinate  $h_0$  to  $h$  is the same value for all system objects and does not change on each movement segment. Thus, synchronization is ensured when the system objects reach the specified coordinates. As the value of  $h_0$  in expression (5), the coordinate value is taken, which was reached by the time the movement ended along the previous linear segment. Next, the system objects movement was simulated in accordance with equation (5).

MATLAB mathematical package was chosen as an surface generator. One of the advantages of MATLAB, unlike other mathematical packages that are similar in functionality (Octave, Maple), is the ability to transfer data through the COM port [6, 7, 8]. However, the disadvantage of this mathematical package, as well as the Maple package, unlike Octave, is that they have a paid license and require large PC compu-

ting power. Therefore, in the future it will be necessary to develop own Windows application, which would allow creating the necessary installations and controlling the entire system.

For simulating installation formation process, a function was generated using the free Desmos platform [9]. The function expression has the following form:

$$f(t) = 0,939 \cdot \frac{(\sin(0,43 \cdot t) + 1) \cdot (\sin(t) + 1)}{(1 + e^{-t+13,5}) \cdot (1 + e^{t-135})}. \quad (6)$$

Function (6) was determined on a time interval from 0 to 100 seconds with a step of 0,01. Thus, 10000 values of the function  $f(t)$  were obtained for each time reference. The function graph is shown in Figure 8.

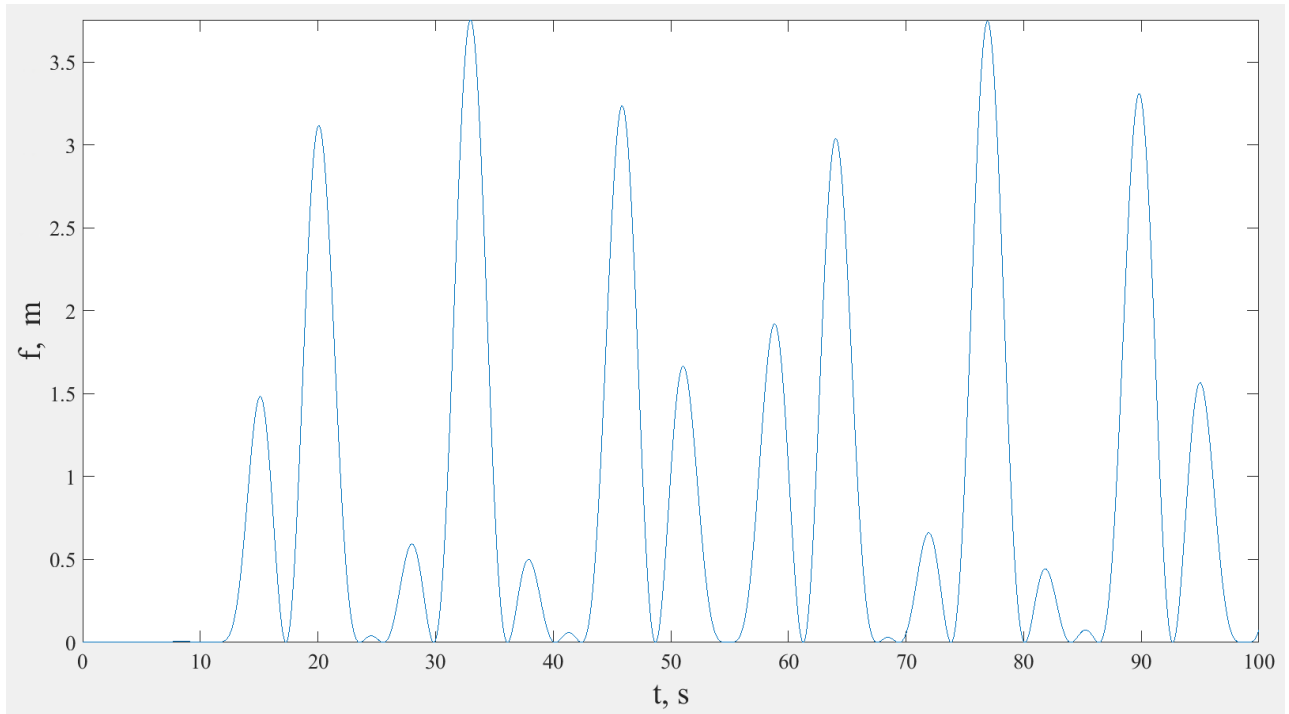


Figure 8 – Function graph for installation formation

Further, in the mathematical package Matlab, a script was generated for the movement of one object repeating the path defined with the function formed above. The scrip listing is presented in Appendix A.

At the initial time, the system object is in the zero position, that is,  $h_0 = 0$ . Then the script takes the value of the function  $f(0)$  as the given coordinate  $h$ . The travel time, which was taken equal to 100 ms for the smooth movement organization reasons (the value can be changed), determines the time interval through which the

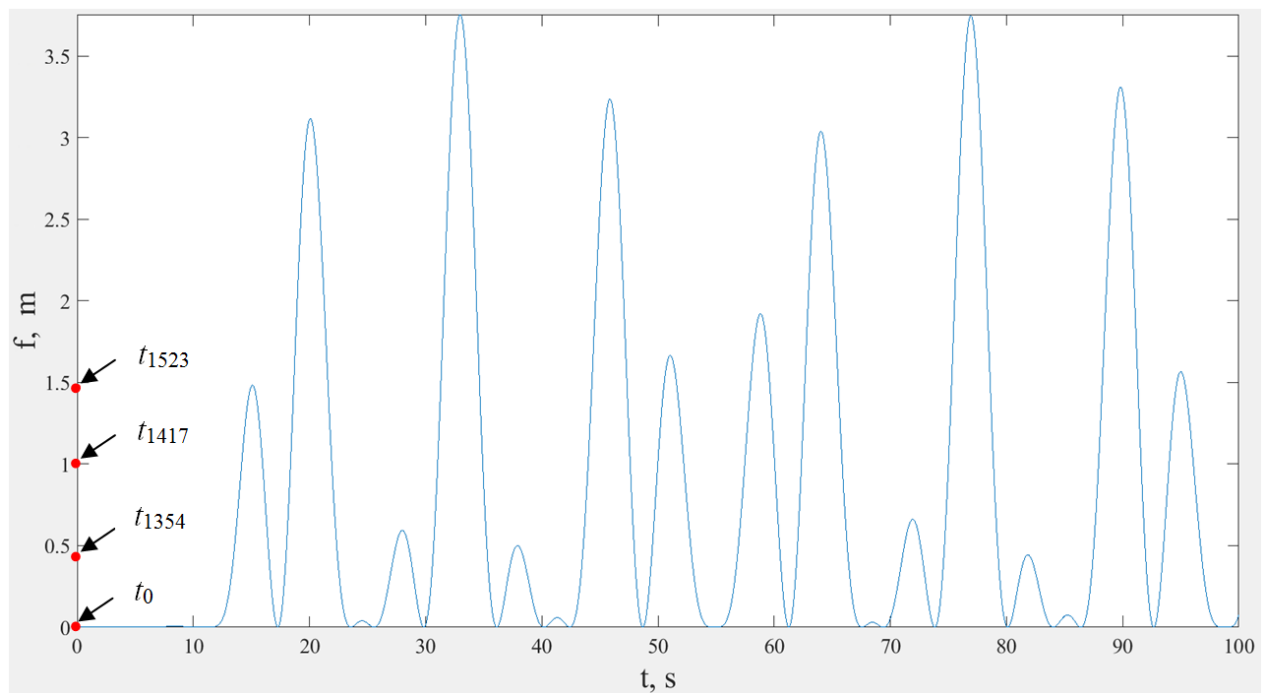
system object reaches the specified coordinate. Based on these data, the developed script calculates the object speed on a linear interval from its zero position to the motion start coordinate function, in accordance with equation (5):

$$v(0) = \frac{h(0) - h_0(0)}{t} = \frac{f(0) - 0}{0,1} = \frac{0 - 0}{0,1} = 0 \text{ m/s.}$$

When the system object reaches the specified coordinate, its value is taken as the parameter  $h_0$ , that is,  $h_0=f(0)$ , and as the parameter  $h$ , the script takes the value of the function  $f(1)$ , that is, there is a shift in unit values with the function values. Then the script again calculates the movement speed at a given interval:

$$v(1) = \frac{h(1) - h_0(1)}{t} = \frac{f(1) - f(0)}{0,1} = \frac{0 - 0}{0,1} = 0 \text{ m/s.}$$

The speed calculation procedure is performed for all values of the function  $f(t)$  (10000 values) with the single step. The speed calculated in this way is used to visualize the system object movement to a given point. The script result is shown in Figure 9.



$$t_0 = 0 \text{ s}; \quad t_{1354} = 13,54 \text{ s}; \quad t_{1417} = 14,17 \text{ s}; \quad t_{1523} = 15,23 \text{ s}$$

Figure 9 – One object movement

Figure 9 shows the system object positions, represented as red dots, at different points in time. The system object takes as a parameter  $h$  the values of a given function, while having only one freedom degree. Then a processing cycle for the movement of all system objects was added to the script, as shown in Appendix B.

Количество объектов в системе было принято равным 20. Основное отличие разработанного скрипта от описывающего движение одного объекта системы заключается в том, что движение каждого объекта описывается по формуле:

$$h_i(t + i) = h_0(t)_i + v_i(t) \cdot t, \quad (7)$$

where  $h_i$  – set "droplet" position, m;

$h_0$  – starting "droplet" position, m;

$v_i$  – “droplet speed”, m/s;

$t$  – movement object time to a given point, s;

$i$  – "droplet" number.

At the initial time, each point has its own given coordinate:  $h_1(t_0) = f(t_0+1)$ ,  $h_2(t_0) = f(t_0+2)$ , ...,  $h_{20}(t_0) = f(t_0+20)$ . Then at time  $t_1$  we have the following given coordinates of the objects:  $h_1(t_1) = h_2(t_0)$ ,  $h_2(t_1) = h_3(t_0)$ , ...,  $h_{19}(t_1) = h_{20}(t_0)$ . For the 20th system object, the specified coordinate  $h_{20}(t_1)$  is equals to function value  $f(t_1+20)$ . Thus, in the model signal of the motion trajectory at each time the trajectory of next system object is repeated by the previous system object. Moreover, the object speed in each interval is calculated by the formula (7). The result of the modernized script is shown in Figure 10.

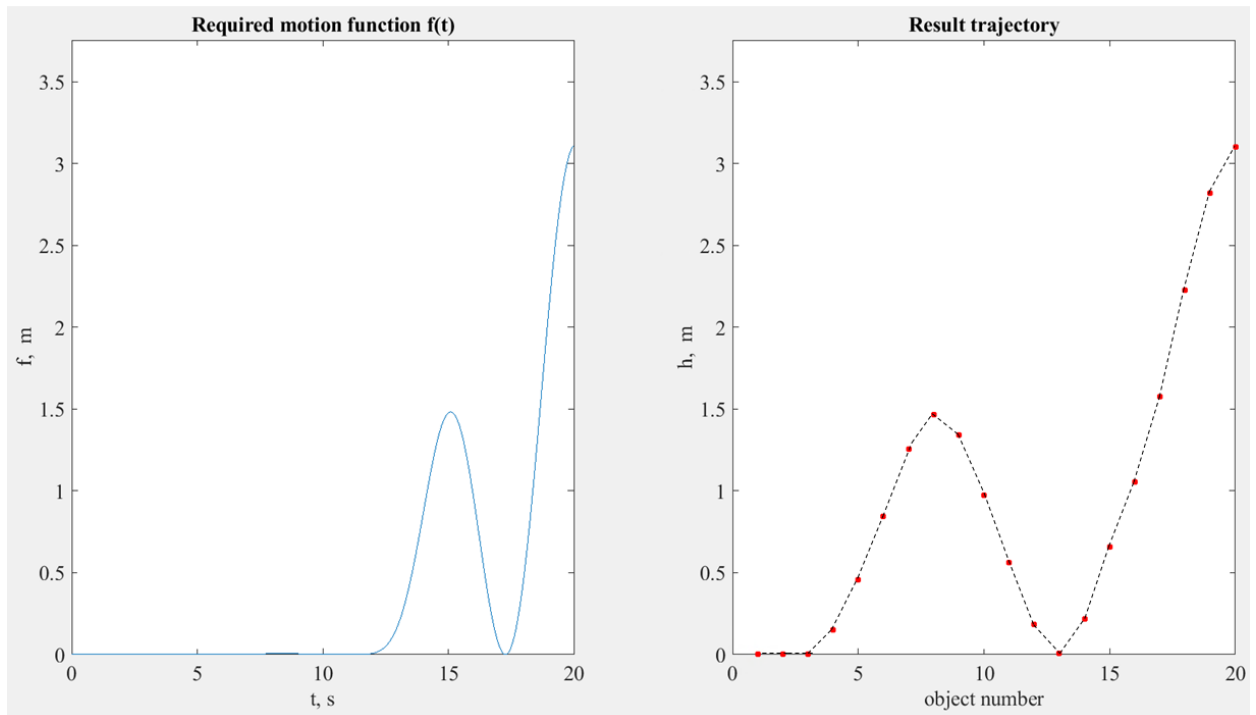


Figure 10 – Several objects movement

In Figure 10, system objects represented as red dots, form a fragment of the trajectory. All objects in the system move along linear intervals, as shown in Figure 10. The objects movement smoothness is achieved due to function definition domain formation with step 0,01.

To determine the formation accuracy of a given trajectory fragment using the system objects, Table 2 was generated containing the coordinates of each object and theoretical coordinates for the object from the given motion function.

Table 2 – Theoretical and simulated object coordinates

Object number	Function $f(t)$ value, m	Coordinate $h$ of object, m	Ratio error, %
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0,1485	0,1492	0,47
5	0,4602	0,4679	1,67
6	0,8648	0,8738	1,04
7	1,2505	1,25	0,04
8	1,4497	1,468	1,26
9	1,3455	1,336	0,71
10	0,9798	0,9813	0,15



Table 2 continuation – Theoretical and simulated object coordinates

Object number	Function $f(t)$ value, m	Coordinate $h$ of object, m	Ratio error, %
11	0,5168	0,5108	1,16
12	0,1514	0,1517	0,2
13	0	0	0
14	0,2165	0,2157	0,37
15	0,6488	0,6462	0,40
16	1,265	1,276	0,87
17	1,7078	1,708	0,012
18	2,2124	2,212	0,02
19	2,8487	2,858	0,33
20	3,1092	3,109	0,006

In Table 2, the maximum relative error in modeling a fragment of the trajectory is 1.67%, therefore, the simulated fragment accurately repeats the given motion function, which indicates the correctness of the system objects movement mathematical description. To create an installation from system objects, it is necessary to transfer to the control server a complete set of information, presented in the form of specified coordinates and speeds, for all objects. Since system coordinate center is located under the room ceiling where it is mounted, to calculate the specified coordinates, it was decided to subtract the motion function values from the room height, for which a variable containing the room height was added to the script.

In order to form complete information, set for all objects, a script was developed that uses predefined data on the structure height above the floor, the system objects number and the movement time. The script listing is presented in Appendix C. The script generates two two-dimensional arrays at the output with the given coordinates and speeds at each step for 10 system objects as shown in Tables 3 and 4, respectively.

Table 3 – Fragment of specified coordinates array at each step

Object number	Time, s					
	0,01	...	1,75	1,76	1,77	100
1	0		0	0	0	0
2	0		0	0	0	

Table 3 continuation – Fragment of specified coordinates array at each step

Object number	Time, s					
	0,01		1,75	1,76	1,77	100
3	0	...	0	0	0	0
4	0		0.0027	0.0028	0.0029	0
5	0		0.0053	0.0052	0.0051	0
6	0		0	0	0	0
7	0		0.0268	0.034	0.0427	0
8	0		0.9214	0.9902	1.0577	0
9	0		1.1274	1.0438	0.9551	0
10	0		0.0868	0.1518	0.2344	0

Table 4 – Fragment of speeds array at each step

Object number	Time, s					
	0,01		1,75	1,76	1,77	100
1	0	...	0	0	0	0
2	0		0	0	0	0
3	0		0	0	0	0
4	0		0.0011	0.0012	0.0012	0
5	0		0	-0.001	-0.0012	0
6	0		0	0	0	0
7	0		0.05969	0.07233	0.0867	0
8	0		0.6934	0.6881	0.6746	0
9	0		-0.7703	-0.8353	-0.8874	0
10	0		0.4703	0.6501	0.8252	0

Based on the data presented in tables 3 and 4, data graphs (given coordinates and speeds) were built that were transmitted to each system object, shown in Figures 11 and 12.

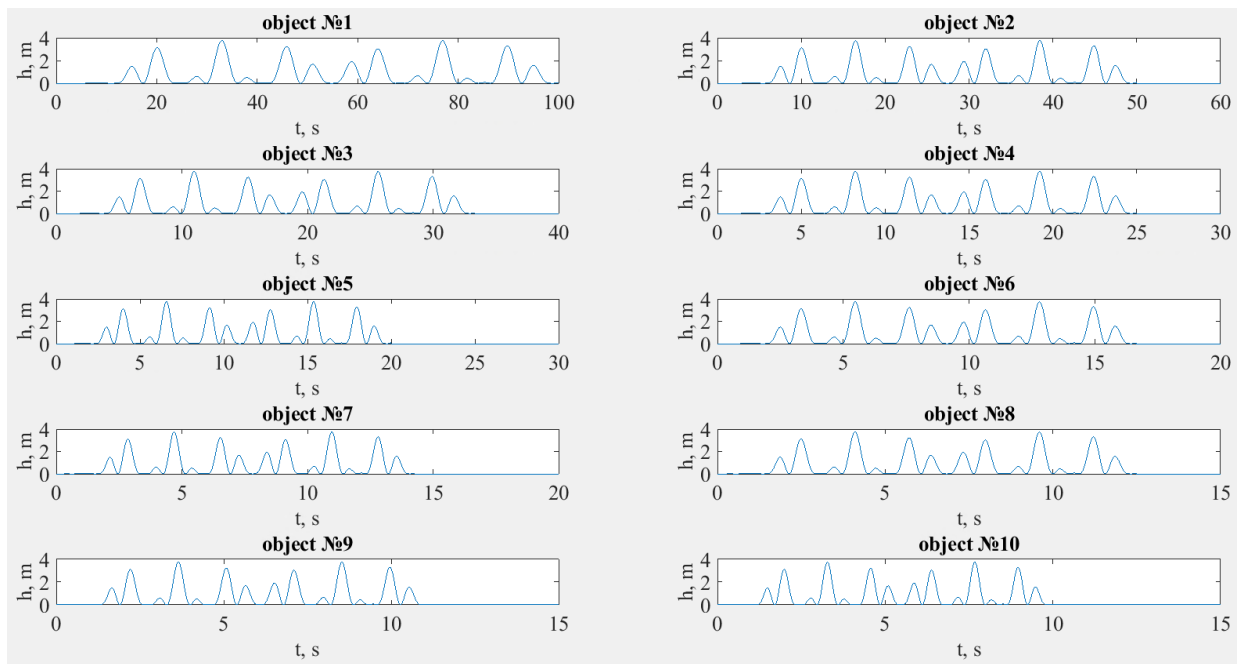


Figure 11 – Graphs of set coordinates for each system object

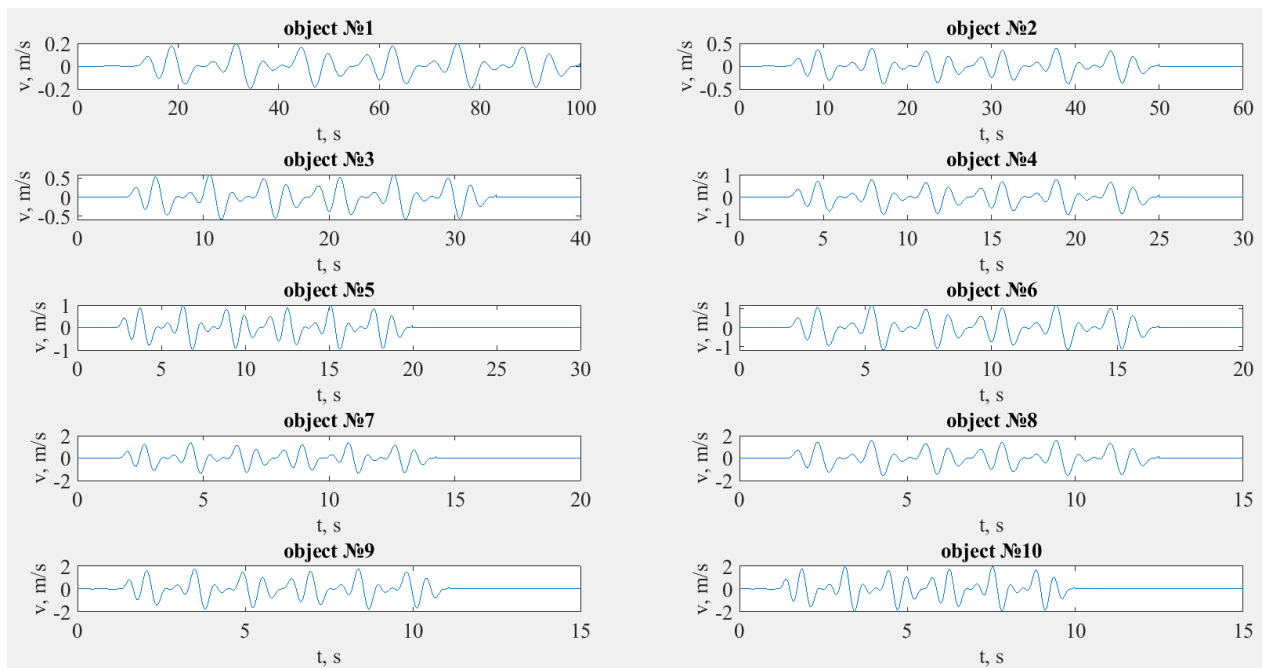


Figure 12 – Speed graphs for each system object

Due to the fact that the motion function definition domain is limited and some system objects reach it earlier than others, in this case the calculating coordinates and speeds process stops for them, as shown in Figures 11 and 12.

In addition, this script compares the speed calculated at each step with the maximum (2 m/s). If it is exceeded, the program generates an error and offers to set a different travel time (during which all system objects will reach their predetermined

positions), on the basis of which it is necessary to recalculate the speeds for all system objects (Figure 15).

```
>> DataScript  
Установите параметр RefreshTime >= 51
```

Figure 15 – Error when exceeding maximum speed

In case of successful script execution, without errors, the received data is sent to each executive device through the control server after the time interval specified in the script [11].

### 1.5 The Chapter 1 conclusion

In this chapter, the system concept was developed, its main nodes were defined, communication interfaces between the nodes were selected, and a structural system diagram was formed.

The “raindrops” motion analytical model was also built and their motion was simulated using the Matlab package. The resulting of the system objects movement mathematical description allows placing the system objects in the correct order, while visually accurately repeating the specified motion function. The line great continuity when forming the trajectory in a real system can be achieved by increasing the number of objects (“raindrops”) and reducing the distance between them.

In addition, a script was developed to form a complete data set for the system. The data obtained using this script is transmitted to each executive device after a certain time interval.

### References

- 1.Changi Airport, Singapore: EtherCAT synchronizes the movement of 1,216 servo axes // BECKHOFF PC Control [Electronic resource]. Access mode: [https://www.pc-control.net/pdf/012013/solutions/pcc\\_0113\\_cover\\_e.pdf](https://www.pc-control.net/pdf/012013/solutions/pcc_0113_cover_e.pdf) (accessed: 01.03.2020).
- 2.Jan Axelson. Serial Port Complete: COM Ports, USB Virtual COM Ports, and Ports for Embedded Systems Second Edition – Madison, 2007. –379p.

3. CAN interface // Microelectronics market. Electronic Components Reference [Electronic resource]. Access mode: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/interface/can/start.htm> (accessed: 05.03.2020).

4. Interface bus IIC (I2C) // Easy Electronics. Electronics for everyone [Electronic resource]. Access mode: <http://easyelectronics.ru/interface-bus-iic-i2c.html> (accessed: 05.03.2020).

5. Industrial networks and interfaces // APCS Encyclopedia [Electronic resource]. Access mode: [https://www.bookasutp.ru/Chapter2\\_1.aspx](https://www.bookasutp.ru/Chapter2_1.aspx) (accessed: 05.03.2020).

6. MATLAB // Wikipedia. Free encyclopedia [Electronic resource]. Access mode: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MATLAB> (accessed: 10.03.2020).

7. Maple // Wikipedia. Free encyclopedia [Electronic resource]. Access mode: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Maple> (accessed: 10.03.2020).

8. GNU Octave // Wikipedia. Free encyclopedia [Electronic resource]. Access mode: [https://ru.wikipedia.org/wiki/GNU\\_Octave](https://ru.wikipedia.org/wiki/GNU_Octave) (accessed: 10.03.2020).

9. Desmos // Free Math [Electronic resource]. Access mode: <https://www.desmos.com/> (accessed: 12.03.2020).

10. Yudin A. I. «Kinetic Rain» system development / A. I. Yudin, A.S. Fadeev; scientific director A.S. Fadeev // Educational forum: science development prospects: International scientific-practical conference materials collection, 30 April 2020, Kemerovo. — Kemerovo: Science Pro Press, 2020. — [P. 31-36].